Pomiary Automatyka Robotyka, ISSN 1427-9126, R. 27, Nr 1/2023, 5–18, DOI: 10.14313/PAR_247/5

Robotyka: techniki, funkcje, rola społeczna Cz. 2. Aktualne możliwości robotów

Cezary Zieliński
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Streszczenie: Aby ocenić, jaki wpływ będą miały roboty na społeczeństwo, należy skrupulatnie przeanalizować obecny stan wiedzy, a w szczególności wskazać fundamentalne problemy, które jeszcze nie zostały rozwiązane, mające istotne znaczenie dla potencjalnych zmian społecznych powodowanych rozwojem robotyki. Wspomniany wpływ zależy od inteligencji robotów, więc ten aspekt dominuje w przedstawionej tu analizie. Rozważania zostały podzielone na trzy części: 1) analizę czynników technicznych wpływających na inteligencję i bezpieczeństwo robotów, 2) analizę obecnych możliwości robotów, 3) analizę przewidywań dotyczących rozwoju robotyki, a w konsekwencji poglądów na skutki tego rozwoju dla społeczeństwa. Niniejszy artykuł poświęcony jest drugiemu z wymienionych tu trzech zagadnień.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, robot usługowy, robot terenowy

1. Wstęp

W pierwszej części artykułu przedstawiono czynniki, które mają wpływ na inteligencję i bezpieczeństwo robotów, bo to one determinują akceptację społeczną tych urządzeń. Ponadto właśnie te czynniki określają możliwość wykorzystania robotów w usługach oraz do wspomagania ludzi w ich życiu codziennym. To przydatność robotów i ekonomia przesądzają o chęci konstruowania i korzystania z tych automatów. Oczywiście istnieje jeszcze jeden czynnik – poznawczy, który tu traktuję marginalnie. Starając się uczynić roboty inteligentnymi i autonomicznymi wnikamy coraz głębiej w istotę inteligencji, a więc coraz bardziej poznajemy siebie samych, a w szczególności wnikamy w sposób funkcjonowania naszego organizmu oraz zachowania nas samych w naszym otoczeniu.

W tej części artykułu zostanie przeanalizowany obecny stan rozwoju robotów oraz dotychczasowe tempo zmian. Ponadto pokazane będzie, jak czynniki wpływające na rozwój robotów inteligentnych, przedstawione w pierwszej części artykułu, zostały wykorzystane do tworzenia obecnych robotów. Na tej podstawie można wskazać ograniczenia obecnej technologii oraz próbować ekstrapolować, jaki będzie dalszy rozwój tych maszyn.

Autor korespondujący:
Cezary Zieliński, cezary.zielinski@pw.edu.pl

Artykuł recenzowany
nadesłany 06.11.2022 r., przyjęty do druku 03.01.2023 r.

2. Obecny stan robotyki

Wiele klasycznych zagadnień rozpatrywanych na gruncie robotyki znalazło już zadowalające rozwiązania. Przykładowo, wiadomo, jak należy konstruować manipulatory, by uzyskać analityczne rozwiązanie prostego i odwrotnego zagadnienia kinematyki. Dynamika manipulatorów czy klasyczne metody sterowania tymi urządzeniami też są dobrze poznane. Nie nastręczają problemów konstruktorom: sterowanie pozycyjne, projektowanie manipulatorów o sztywnych członach, budowa kołowych baz mobilnych przemieszczających się po płaskich horyzontalnych powierzchniach czy konstrukcja mechaniczna wielu składowych części robotów oraz podstawowe czujniki, silniki i siłowniki czy elementy przeniesienia napędu. Nie oznacza to, że w tych dziedzinach nie są prowadzone badania, ale to, że spodziewamy się tu co najwyżej udoskonalenia obecnych rozwiązań technicznych, czyli osiągnięć inkrementalnych, a nie przełomowych. Nie tutaj leżą główne problemy do przezwyciężenia przez robotyków. Niemniej jednak w klasycznej robotyce nadal spodziewamy się ulepszeń w takich dziedzinach jak: miniaturyzacja sztywnych elementów konstrukcji, wykorzystanie lżejszych materiałów, zwiększenie udźwigu i szybkości robotów. Struktury sprzętowe układów sterowania bazują na współczesnych komputerach i sterownikach ruchu, a więc postęp w tej materii głównie napędzany jest osiągnięciami producentów tego sprzętu, a nie samych robotyków.

Ponadto istnieje sfera badań, które doprowadziły do powstania bardzo zaawansowanych rozwiązań, ale nadal nie są to technologie, które uważa się za wystarczająco rozwinięte. Dalszych badań wymagają: maszyny kroczące i wspinające się, chwytaki, w szczególności wielopalczaste, a przede wszystkim zastosowanie sztucznej inteligencji w sterowaniu robotami. W szczególności percepcja maszynowa wymaga rozwiązania problemu kotwiczenia, a więc asocjacji pojęć symbolicznych z informa-

cją bezpośrednio zawartą w sygnałach uzyskanych z czujników. Uczenie maszynowe oraz przetwarzanie wielkich zbiorów danych (big data) są innymi zagadnieniami badanymi na gruncie szeroko rozumianej sztucznej inteligencji. Uzyskane rozwiązania zostaną inkorporowane do sterowników robotów. Źródłem wielkich zbiorów danych są przede wszystkim własne czujniki robotów, ale również zasoby Internetu i te zawarte w chmurach obliczeniowych.

Już powyższy, dość wyrywkowy przegląd zagadnień będących przedmiotem zainteresowania robotyków, wskazuje na rozległość prowadzonych prac badawczych. Wyczerpujący wgląd zarówno w zastosowania robotów, jak i w ich konstrukcję nie jest możliwy w ograniczonych ramach tego artykułu. Niemniej jednak trzeba przynajmniej przeprowadzić powierzchowny przegląd, wskazujący na obecne możliwości robotyki, by prawidłowo ocenić, jaki wpływ będą miały na społeczeństwo roboty w niezbyt odległej przyszłości. Warto też spojrzeć wstecz, by ocenić, jaki postęp dokonał się w tej dziedzinie w ciągu ostatnich dziesięcioleci. To pozwoli ocenić tempo zachodzących zmian.

By ułatwić dyskusję, należy podzielić roboty na pewne kategorie. W pierwszej części tego artykułu przyjęto, jako kryterium podziału robotów, stopień strukturyzacji, a więc uporządkowania środowiska, w którym dany robot działa. Ta kategoryzacja zostanie tu wykorzystana.

2.1. Roboty przemysłowe

Robotyka swój komercyjny sukces zawdzięcza szerokim zastosowaniom w przemyśle. Od zaprezentowania przez firmę Unimation w 1961 r. [59] pierwszego robota przemysłowego, o nazwie Unimate, osiągi tych urządzeń znacznie się zwiększyły. Za przykład niech posłuży relacja udźwigu do masy manipulatora. Następca wspomnianego robota Unimate z 1972 r., także dysponował napędem hydraulicznym oraz pięcioma stopniami swobody, a miał masę 1700 kg i udźwig 12 kG [19]. Opracowany przez firmę ASEA pierwszy robot o napędach elektrycznych, był produkowany w latach 1975–1992, też miał 5 stopni swobody, ale masę tylko 125 kg i udźwig 6 kG, podczas gdy opracowany wspólnie z DLR w 2006 roku LWR (Light Weight Robot) firmy Kuka, mający siedem stopni swobody, ma masę 16 kg i udźwig 7 kG. Tak się stało mimo to, że moc z jednostkowej masy napędu dla silników elektrycznych jest w granicach 25–150 W/kg, a dla siłowników hydraulicznych 650 W/kg [38]. Wszakże od czasu pojawienia się LWR niewiele się zmieniło – nastąpiło nasycenie. Nawet sześcioosiowy kobot wprowadzony na rynek przez Universal Robots w 2008 r., który z natury rzeczy powinien być lekki, ma udźwig 5 kG, a masę 18 kg. Wprawdzie postęp jest znaczny, ale niestety wypada blado na tle nawet niezbyt atletycznie zbudowanego mężczyzny, którego masa ramienia wynosi 5 kg [8], natomiast udźwig 20 kG [21].

Ponieważ pierwsze roboty były bardzo ubogo wyposażone w czujniki, wymuszało to dostosowanie linii produkcyjnych do współpracy z robotami. Oznaczało to precyzyjne usytuowanie wszystkich urządzeń współpracujących z robotem oraz odgrodzenie robota od ludzi. Wejście człowieka w strefę ruchu robota powodowało automatyczne jego wyłączenie. To podejście obecnie ulega zasadniczej zmianie.

Wspomniane już wcześniej koboty mają bezpośrednio współpracować z robotnikami, więc ich odgrodzenie od ludzi nie jest możliwe. Pierwotnie kobotami nazwano roboty, które ograniczały możliwość odejścia z zaplanowanej ścieżki ruchu, ale dopuszczały dowolną modyfikację zachowania się wzdłuż tej ścieżki [25, 56, 62]. Ruch prostopadły do ścieżki był ograniczony, natomiast ten wzdłuż niej mógł być dowolnie kształtowany przez samego kobota albo operatora z nim współpracującego. Definicje ścieżki określały wirtualne powierzchnie ograniczające swobodę ruchu. Obecnie pojęcie kobota zostało rozszerzone na urządzenia, które nie tylko ograniczają możliwość wykonania niewłaściwych ruchów, ale również wykrywają intencje operatora. Zamontowanie czujników sił i momentów sił umożliwia wykrycie kierunku ruchu przedmiotu wspólnie przenoszonego z człowiekiem. Wirtualne powierzchnie ograniczają niepożądane ruchy, natomiast precyzyjne ustawienie obiektu oraz prędkość jego ruchu jest określana przez operatora. Bezpieczeństwo robotników współpracujących z kobotami zapewniane jest przez: dodatkowe czujniki, redukcję masy ramienia, brak ostrych krawędzi na obudowie, zmniejszenie mocy silników oraz pokrycie ramienia materiałami miękkimi.

Koboty wymagają również zmiany podejścia do programowania robotów. Hybrydowe metody programowania polegające na zastosowaniu tekstowego języka oraz wprowadzaniu wybranych pozycji ramienia z wykorzystaniem robota zainstalowanego na linii produkcyjnej (wodzenie ramienia) [78] nadal są wykorzystywane przez koboty, ale w zmodyfikowanej postaci. Panel dotykowy służący do programowania kobota korzysta z okienkowego interfejsu z językiem ikonicznym, ale zwiększono rolę wodzenia ramienia. W odróżnieniu od klasycznych robotów przemysłowych, dzięki czujnikom, koboty automatycznie zwalniają, a w razie potrzeby zatrzymują się, gdy niespodziewanie pojawi się człowiek. Operator w trakcie pracy kobota może przerywać lub korygować jego ruchy, co umożliwia wspólne przemieszczanie ciężkich przedmiotów do niezbyt precyzyjnie określonych pozycji docelowych. Do prostego współdziałania z ludźmi pracującymi przy linii produkcyjnej wystarcza, że robot nie narusza stref, gdzie może znajdować się człowiek lub ruchome części urządzeń – jest to zachowanie pasywne.

Najbardziej zaawansowanym kobotem jest Robonaut 2 (R2) [10] stworzony we współpracy między NASA i General Motors (GM). Początkowo był to dwuramienny tors z ruchomą głową, który współpracował z astronautami na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej w latach 2011–2018. W 2014 r. dodano mu dwie nogi zakończone chwytakami zamiast stóp. Przeznaczony był do wykonywania wewnątrz stacji kosmicznej prac wymagających zręczności. Dwa ramiona robota mają po siedem stopni swobody, nogi również po siedem, szyja, na której posadowiono głowę z kamerami, ma trzy stopnie swobody. Jego chwytaki to pięciopalczaste dłonie przypominające ludzkie, z czujnikami dotyku na każdym końcu palca. Palce dłoni łącznie mają 12 stopni swobody: cztery kciuk, dwa palce najbliższe kciuka po trzy, a dwa pozostałe po jednym. Zdecydowano się na tak skomplikowaną konstrukcję dłoni, by robot był w stanie wykorzystywać te same narzędzia, co astronauci. Sześcioosiowe czujniki sił i momentów sił są zainstalowane zarówno w nadgarstku jak i barku. W głowie zainstalowana jest stereo-para kamer. W rzeczywistości głowa zawiera cztery kamery, a więc redundantną konfigurację w celu zwiększenia niezawodności. Dodatkowo ma kamerę czułą na promieniowanie podczerwone. Służy ona do pomiaru odległości do oglądanych obiektów. Sterowanie tym urządzeniem wymaga 38 procesorów Power PC. Spowodowane jest to zarówno licznością stopni swobody, jak i rozbudowanym układem percepcji oraz koniecznością planowania czynności, w szczególności tych wymagających dwuręczności, oraz koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa działania. Ograniczenie sił dynamicznych wytwarzanych przez człony o dużej masie zapewniane jest przez zastosowanie w sterowaniu jakobianu z wagami zależnymi od mas członów [9]. Robonaut został stworzony, by zbadać na ile robot może być pomocny astronautom. Przeznaczony był do autonomicznego wykonywania prac wymagających zręczności, np. wymiany paneli elektronicznych, ale możliwe było też teleoperowanie nim albo ze stacji kosmicznej albo z Ziemi. Wizja i czucie siły umożliwiały bezpieczne współdziałanie z astronautami. Firma GM zaangażowała się w projekt, bo spodziewa się, że tego typu roboty będą w stanie wykonywać w fabrykach autonomicznie powtarzalne, nudne lub niebezpieczne zadania, przy ewentualnej drobnej ingerencji współdziałających ludzi.

Obecnie prowadzi się badania nad kobotami, które mają oceniać intencje osób, dzięki czemu koboty będą mogły nie tylko unikać kolizji, ale również aktywnie współdziałać z ludźmi. Do tego jednak zestaw receptorów kobota musi być dużo bardziej różnorodny. Potrzebne są kamery do obserwacji ludzi oraz mikrofony, aby można było wydawać mu polecenia głosem. Pokazuje to, że różnice między kobotami stosowanymi w przemyśle i robotami usługowymi stopniowo się zacierają.

Roboty przemysłowe zaludniły (a może zarobotowiły?) też magazyny wysokiego składowania. Supermarket on-line Ocado dostarcza produkty spożywcze zamawiane przez klientów indywidualnych. W tym celu firma ta opracowała zautomatyzowane magazyny obsługiwane przez roboty różnego typu [72]. Interwencja ludzka ograniczona jest do minimum, więc magazyn wygląda jak gigantyczny ul zamieszkały przez setki robotów i wyposażony w kilometry taśmociągów. Algorytmy podobne do tych używanych w lotnictwie determinują, jak roboty maja się poruszać, by uniknąć kolizji i optymalnie zgromadzić towary będące przedmiotem zamówienia. Sercem magazynu są stosy pojemników. Stosy zawierają do 17 pojemników. Specjalny algorytm ustala kolejność pojemników na stosie. Pojemniki zawierające różne produkty mogą być umieszczone na tym samym stosie. Pojemniki z towarem często zamawianym lokowane są na szczycie stosu. Jeżeli potrzebne są te ze spodu roboty usuwają pojemniki z wierzchu przestawiając je na inne stosy. Roboty przemieszczają się nad stosami pojemników. Mogą poruszać się tylko w dwóch prostopadłych kierunkach o kwant równy szerokości stosu. Do swego wnętrza mogą wciągnąć pojemnik wypełniony produktami jednego rodzaju. Pojemnik dostarczany jest do stacji załadunkowej, w której to już ludzie zestawiają i pakują konkretne zamówienie znów do pojemników. Pojemniki z nie w pełni zestawionymi zamówieniami znów trafiają do magazynu, by się pojawić w stacji załadunkowej, gdy w nim będą dostępne potrzebne towary. Człowiek instruowany jest, co ma zrobić, przez komputer wyświetlający na ekranie zestaw poleceń. Prowadzone są badania, których celem jest zastąpienie i tych ludzi przez roboty. Niemniej jednak trzeba wpierw rozwiązać problem chwytania delikatnych towarów o nieregularnych kształtach. Do tego celu niestety nie nadają się chwytaki podciśnieniowe, więc bada się chwytaki wykonane z miękkiej gumy, które nadmuchiwane są w celu realizacji chwytu. Pojemniki lokowane są na stosach przez system taśmociągów odbierających towar przywożony do magazynu. Gdy zamówienie zostało skompletowane taśmociągi dostarczają pojemnik do stacji wysyłkowej. Centralny komputer koordynuje pracę wszystkich urządzeń w magazynie komunikując się z nimi za pomocą technologii 4G, ale w innym paśmie niż to czynią sieci telekomunikacyjne. Magazyny tego typu są skalowalne, liczba stosów i robotów może być różna w różnych magazynach, a ponadto są odporne na awarie robotów – zadania uszkodzonego robota wykonywane są przez innego robota. Oczywiście uszkodzonego robota musi usunąć z magazynu robot ewakuacyjny, ale naprawy dokonują już ludzie. Głównym zyskiem nie jest redukcja zatrudnienia, ale zmniejszenie powierzchni magazynowej, brak konieczności oświetlania i wentylowania pomieszczeń zgodnie z wymaganiami BHP oraz utrzymywania temperatury akceptowalnej przez ludzi.

2.2. Roboty usługowe

Posiadanie maszyn zaspokajających nasze wszelkie potrzeby było od wieków marzeniem ludzi, a obecne statystyki wskazują, że dynamiczny wzrost liczby zarówno jednostek jak i typów produkowanych robotów usługowych szybko przybliża nas do spełnienia tej wizji [77]. Arystoteles w swym dziele Polityka przewidywał zmierzch niewolnictwa, gdy tylko pojawią się maszyny zastępujące pracę niewolników [77]. Szczęśliwie stało się to dużo wcześniej – ze względu na nieefektywność ekonomiczną systemu niewolniczego.

Jak już wcześniej wspomniano, kategoria robotów usługowych obejmuje sobą bardzo szeroka gamę urządzeń, poczynając od odkurzaczy, a kończąc na kompanach człowieka. Warto się przyjrzeć tej różnorodności nieco dokładniej, by zrozumieć, czemu proste roboty usługowe są sprzedawane na masową skalę, natomiast roboty kompani człowieka wymagają jeszcze intensywnych badań.

2.2.1. Proste roboty domowe

Powszechnie stosowanymi robotami osobistymi są autonomiczne odkurzacze (np. Roomba) czy kosiarki do trawników przydomowych (np. Automower). Urządzenia te dysponują czujnikami umożliwiającymi nawigację z omijaniem przeszkód. Zestaw posiadanych czujników wpływa na cenę urządzenia, ale też na jakość sprzątania. Najprostsze wersje odkurzaczy do wykrywania przeszkód używają czujników dotyku lub czujników zbliżeniowych na podczerwień (IR). Informują one układ sterowania o konieczności wykonania skrętu przez platformę mobilną. Ponadto czujniki IR stosowane są do wykrywania gwałtownego obniżenia terenu. Zapobiega to spadnięciu ze schodów lub wjechaniu do rowu. Często odkurzacze dysponują też czujnikami wykrywającymi bariery świetlne, co umożliwia wykluczenie pewnych obszarów ze sprzątania, np. takie, które zawierają cenne przedmioty, które nie powinny być potrącane. Roboty te, gdy wykryją, że stan naładowania ich baterii jest niski, przerywają pracę i jadą do stacji ładowania, którą wykrywają dzięki sygnałom podczerwonym emitowanym przez tę stację. Układ sterowania najprostszych wersji nie jest zbyt wyrafinowany. Prócz omijania przeszkód i nieprzekraczania kurtyn IR zadaniem robota jest takie poruszanie się, by w miarę możliwości pokryć całą sprzątaną lub koszoną powierzchnię. Do tego celu wykorzystywane są algorytmy generujące ścieżkę: spiralną, losową, ruchu kuli bilardowej odbijającej się od ścian. W przypadku wyposażenia w czujniki IR, robot może poruszać się wzdłuż ścian. Najczęściej stosuje się różne kombinacje tych algorytmów. Algorytmy te nie korzystają z mapy pomieszczenia. W wersjach rozbudowanych roboty wyposażane są w kamery lub dalmierze laserowe IR, co umożliwia zbieranie danych o topografii sprzątanego pomieszczenia. Wtedy robot tworzy mapę i na jej podstawie generuje odpowiednią trajektorię ruchu. Niestety roboty wyposażone w kamery nie mogą tworzyć mapy w ciemnościach, natomiast te wykorzystujące lasery maja problemy z lustrami oraz powierzchniami silnie pochłaniającymi promieniowanie IR. Ponadto odkurzacze mogą być aktywowane o określonych porach dnia lub tygodnia. Wyposażane są też w czujniki wykrywające ilość kurzu wlatującego do dyszy. Najczęściej do tego celu zanieczyszczone powietrze kierowane jest na płytkę metalową. Kurz wprawia ją w drgania. Im amplituda drgań jest większa tym brudniejsza jest podłoga, a więc w tym miejscu robot powinien pozostać dłużej. Pomimo tego bogactwa czujników i zachowań robota, urządzenia tego typu nadal nie radzą sobie we wszystkich sytuacjach. Czasami zdarza im się utknąć pod niskim meblem, co wymaga interwencji człowieka. Niemniej jednak powszechna niechęć do sprzątania, traktowanego jako zajęcie nudne, oraz spadające ceny tych urządzeń spowodowały ich upowszechnienie. Należy się spodziewać, że podobnie będzie z robotami usługowymi, które są obecnie na etapie badań. Wszakże należy zauważyć, że odkurzacze operują niezmiernie uproszczonym modelem otoczenia. Ich ontologia rozróżnia tylko pustą przestrzeń, nadającą się do poruszania, i przeszkody. Takim robotom jest obojętne, czy zderzą się z krzesłem, czy ze ścianą. Reakcja powinna być identyczna. Roboty usługowe, które mają wykonywać bardziej wyrafinowane zadania wymagają o wiele bardziej skomplikowanego modelu otoczenia. To w istotny sposób komplikuje układ

sterowania. Algorytmy umożliwiające pracę w otoczeniu, które przystosowane jest do funkcjonowania ludzi, są o wiele bardziej skomplikowane i dlatego są nadal w fazie badań. Niemniej jednak czynione są tu szybkie postępy.

2.2.2. Logistyka

Usługi logistyczne wymagają operowania wielką różnorodnością towarów, które zazwyczaj muszą być pakowane, a do tego potrzebne są uniwersalne chwytaki i odpowiednio szybkie metody rozpoznawania i lokalizacji obiektów. Obiekty te mogą być duże lub małe, mieć dowolne kształty, mogą być miękkie lub twarde, kruche lub solidne. W związku z tym w latach 2015–2017 urządzane były coroczne zawody Amazon Robotics Challenge [17]. Dla firmy wysyłkowej, jaką jest Amazon, zautomatyzowanie kompletacji zamówień jest kluczowe. Zadaniem zespołów biorących udział w tych zawodach było zaprojektowanie robota, który byłby w stanie rozpoznać i zlokalizować obiekt znajdujący się wśród innych, a następnie uchwycić go i włożyć do kartonowego pudła. Pierwsze zawody z tego cyklu wymagały, aby w czasie nie większym niż 20 minut zdjąć z półki 12 spośród 24 obiektów i umieścić je w pudle. Zniszczenie przedmiotów lub umieszczenie w pudle niewłaściwego obiektu było karane ujemnymi punktami. Obrazy 2D i 3D obiektów były udostępnione konkurującym zespołom przed zawodami. W kolejnych zawodach liczba obiektów była zwiększana, a czas wykonania zadania skracany. Jedne obiekty mogły przysłaniać inne. W 2017 r. dopuszczono własną konstrukcję regału z przedmiotami, co doprowadziło do preferowania pojemników, z których wyjmowano i do których wstawiano obiekty od góry. Ponadto tym razem niektóre z przedmiotów zespoły poznały dopiero na 30 minut przed rozpoczęciem zawodów. Utrudniło to wykorzystanie sieci neuronowych, których użycie wymaga długotrwałego uczenia. Przy tak wydawałoby się nietrudnym zadaniu zespoły nie były w stanie zrealizować zadania w całości, a duża ich część w ogóle nie umieściła żadnego przedmiotu w pudle. Niemniej jednak, mimo wprowadzania utrudnień, z zawodów na zawody wyniki były coraz lepsze. Większość zespołów wyposażyła swoje roboty zarówno w kamery RGB, jak i RGB-D. W rozpoznawaniu obrazów dominowały sieci neuronowe, w szczególności konwolucyjne, których obliczenia wykonywane były na wielu jednostkach graficznych (GPU). Postępy w percepcji były znaczne, natomiast nie dopracowano się uniwersalnego chwytaka o zdolnościach porównywalnych z tymi, jaki posiada ludzka dłoń. Większość zespołów używała kombinacji chwytaka podciśnieniowego (przyssawki) z chwytakiem dwupalczastym. Zespół, który wygrał w 2017 r., wyjął ze sterty 14 wskazanych przedmiotów i odłożył je do pudła, a ponadto wyjął dziewięć obiektów z miejsca składowania, wszystko w ciągu 27 minut [58].

2.2.3. Roboty kompani człowieka

W większości krajów wysoko rozwiniętych populacja ludzi w wieku poprodukcyjnym w stosunku do tych czynnych zawodowo stale wzrasta [48]. Jest to związane z poprawą jakości służby zdrowia, redukcją liczby urodzeń oraz utrzymywaniem relatywnie niskiego wieku emerytalnego. Zapewnienie odpowiedniej opieki ludziom starszym wymaga od rodziny, jeżeli istnieje, ograniczenia swej aktywności zarobkowej, albo zatrudnienie pomocy domowej o odpowiednich kwalifikacjach. Część krajów rozwiązuje ten problem zezwalając na osiedlanie się migrantów. Tam, gdzie nastawienie do migrantów jest negatywne, jedynym rozwiązaniem jest wytworzenie lub zakup robotów usługowych zwanych kompanami. Już obecnie sztuczna inteligencja umożliwia seniorom wspomaganie pamięci. Firma Intuition Robotics skonstruowała urządzenie nazwane ElliQ, które może być używane przez ludzi do nawiązywania kontaktu z innymi przez Internet, przypominania o harmonogramie dnia lub lekarstwach do wzięcia. Interakcja z nim odbywa się za pomocą mówionego języka naturalnego. Japoński robot terapeutyczny Paro, przypominający wyglądem pluszową zabawkę imitującą małą fokę, uczy się interakcji z człowiekiem. Dzięki czujnikom rozpoznaje kontekst sytuacyjny i stara się w zależności od niego albo absorbować uwagę człowieka albo nie przeszkadzać. Ten rodzaj zabawki imitującej małe zwierzę ma istotny wpływ na redukcję stresu i dlatego jest również stosowany w szpitalach.

Ludzie starsi nie akceptują zmian wprowadzanych do ich domów, więc ich kompani muszą być dostosowani do operowania w warunkach domowych, jakie zastaną. Zmiana wyposażenia lub wyglądu mieszkania raczej nie wchodzi w rachubę. Środowisko domowe wymaga dwuręczności, postrzegania wzrokowego i dotykowego, umiejętności przemieszczania się w pomieszczeniach z przeszkodami, rozumienia funkcji poszczególnych pomieszczeń oraz przedmiotów znajdujących się w nich, etc. Stąd konstrukcyjnie muszą przypominać ludzi, a więc preferowane są roboty humanoidalne. Ponadto roboty tego typu nie tylko muszą być w stanie prowadzić konwersację na odpowiednim poziomie, ale również dostosowywać się do charakteru i aktualnego stanu emocjonalnego interlokutora. Na marginesie warto zauważyć, że roboty tego typu mogą być również stosowane jako cierpliwi opiekunowie dzieci.

W 2022 r. Elon Musk przedstawił robota humanoidalnego Optimus, stanowiącego wstępny prototyp urządzenia, które Tesla ma produkować w milionach egzemplarzy [6]. Na tle możliwości innych robotów humanoidalnych nie wypada on najlepiej, ale biorąc pod uwagę, że został skonstruowany w niespełna rok i to, że tworzony jest z myślą o produkcji, przy wykorzystaniu tej samej technologii, która jest stosowana przy wytwarzaniu samochodów Tesla, to można mieć nadzieję, że za jakiś czas w istocie tego typu roboty zaczną być produkowane seryjnie. Oczywiście podstawowym problemem jest tu użyteczność tego urządzenia, a ona wymaga odpowiedniego oprogramowania wykorzystującego sztuczną inteligencję. Niemniej jednak imponujący jest przewidywany koszt – 20 tys. dolarów za jednego robota przy seryjnej produkcji. Wprawdzie Elon Musk rysował optymistyczną wizję, z której wynikało, że tego typu roboty są już na horyzoncie, ale na wszelki wypadek nie sprecyzował, kiedy będą dostępne komercyjnie – mówił o 5 do 10 lat. Z tego rozrzutu wynika, iż jest to bliżej niesprecyzowana przyszłość. Wytworzenie humanoida nie jest obecnie wyzwaniem technologicznym, ale wytworzenie prawdziwego robota kompana, który będzie akceptowany przez ludzi, nadal jest. Ciekawe, jak Tesla poradzi sobie z tym wyzwaniem? Zapewne zacznie od wytworzenia humanoidalnego kobota współpracującego z ludźmi w fabryce. W każdym bądź razie ma odpowiednie środowisko do testowania takich urządzeń – własne fabryki.

2.2.4. Operowanie w środowisku człowieka – chwytanie

Potrzeby przemysłu wymusiły na producentach robotów opracowywanie coraz to nowszych narzędzi montowanych, jako końcówki manipulatorów. Podstawowe narzędzia to: chwytaki, spawarki, zgrzewarki, pistolety natryskujące farbę, szlifierki, urządzenia do polerowania i nanoszące klej czy frezarki. Możliwości ich zastosowania wynikały bezpośrednio z wysokiej powtarzalności pozycjonowania oraz z prędkości ruchu, która czyniła robotyzację ekonomicznie uzasadnioną. Stosuje się chwytaki: dwupalczaste, kształtowe, podciśnieniowe, elastyczne [46]. Każde z tych rozwiązań ma ograniczone zastosowanie. Bogactwo narzędzi, w które mogą być wyposażone roboty, czyni je uniwersalnymi urządzeniami produkcyjnymi. Niemniej jednak różnorodność chwytaków związana jest z dążeniem do uczynienia robotów uniwersalnymi urządzeniami zdolnymi świadczyć wszelkie usługi, więc działającymi w środowisku stworzonym dla ludzi i operujących przedmiotami przeznaczonymi do używania przez człowieka.

Najlepiej byłoby odwzorować ludzką dłoń, ale to jest trudne do osiągnięcia z punktu widzenia konstrukcji mechanicznej. Liczba stopni swobody ludzkiej dłoni jest zbyt duża (pięciopal-

czasta dłoń ma 23 stopnie swobody [55]), by móc zastosować odpowiednią liczbę silników – chwytak byłby zbyt duży i ciężki [52]. Chwytaki z silnikami wbudowanymi w złącza palców albo są ciężkie albo mają małą siłę chwytu. Co więcej niebagatelnym problemem jest doprowadzenie do silników przewodów zarówno zasilających jak i sterująco-pomiarowych. Usunięcie silników z obszaru dłoni czyni konstrukcję lżejszą, ale przeniesienie napędu (linkowe, cięgnowe, przekładniowe) obniża udźwig takiego urządzenia i nie jest niezawodne. Ponadto silniki muszą być przeniesione w inne miejsce i skupione w niewielkiej przestrzeni. Wszystkie te rozwiązania zwiększają tarcie w układzie mechanicznym, komplikując sterowanie ruchem palców. Istotnym problemem jest zabezpieczenie chwytaka wielopalczastego przed uszkodzeniem w przypadku sterowania pozycyjnego, gdy niektóre palce w trakcie chwytania zetknęły się przedwcześnie z obiektem. Można albo stosować czujniki dotyku lub sił albo elementy podatne lub odpowiednie sprzęgła [54]. Najlepiej zastosować kombinację tych metod jednocześnie i sterowanie pozycyjno-siłowe. Dłonie mające elastyczne człony bądź stawy upraszczają chwytanie, gdyż palce samoistnie dostosowują się do kształtu chwytanego przedmiotu, ale zazwyczaj zmniejsza to precyzję i siłę chwytu.

Chwytaki wielopalczaste można podzielić na: antropomorficzne i nieantropomorficzne. Antropomorficzne, jak nazwa wskazuje, imitują dłoń ludzką, natomiast te drugie nie. Zaletą chwytaków antropomorficznych jest to, że dzięki imitacji ruchu dłoni ludzkiej łatwiej jest nam zrozumieć sposoby manipulacji obiektami, a zatem prościej opracować metody sterowania nimi. Ma to szczególne znaczenie przy teleoperacji. Celem wszakże jest uzyskanie zręczności manualnej podobnej bądź przewyższającej ludzką, niezależnie od struktury chwytaka. Należy jednak zwrócić uwagę, że owa zręczność nie wynika jedynie ze struktury kinematycznej, ale również z liczby, rodzaju i rozdzielczości czujników zamontowanych w chwytaku. Ponadto niebagatelną rolę odgrywają algorytmy sterowania korzystające z informacji sensorycznej, by odpowiednio poruszać członami chwytaka.

Chwytak musi wywierać takie siły na trzymany obiekt, by on się nie wyślizgnął oraz by nie został zgnieciony. Co więcej, rodzaj chwytu musi być dostosowany do wykonywanego zadania. Oznacza to, że sterowanie chwytakiem wymaga istotnej współpracy z nadrzędnym układem sterowania planującym wykonanie zadania. Dodatkowo ludzka dłoń może rozpoznawać przedmioty dzięki wyczuciu kształtu, faktury, temperatury, wagi, twardości etc. Zazwyczaj nie mamy problemu ze zlokalizowaniem konkretnego przedmiotu w plecaku w ciemności. Pożądane jest by tę zdolność aktywnego czucia zreprodukować w robotach. Pomimo prowadzenia od wielu lat (np. [37, 66]) prac badawczych nad chwytakami dla robotów nie udało się zbliżyć do możliwości dłoni ludzkiej. Ani parametry siłowo-ruchowe ani zdolności percepcyjne nie są zbliżone do ludzkich, nie wspominając o zręczności chwytania i manipulacji przedmiotami różnych kształtów. Większość chwytaków, nawet tych wielopalczastych, przystosowana jest do chwytania przedmiotów o ograniczonych, w porównaniu z możliwościami ludzkiej dłoni, kształtach, masie i wymiarach.

Przyzwyczailiśmy się, że roboty budowane są ze sztywnych elementów, ale istnieją również konstrukcje wykorzystujące elementy podatne bądź w całości stworzone z miękkiego tworzywa. Główną motywacją do tworzenia takich urządzeń jest bezpieczeństwo interakcji z nimi [65]. Zderzenie z miękkim robotem jest o wiele mniej groźne niż takie zdarzenie z udziałem twardego odpowiednika. Ponadto podatność ułatwia wiele aspektów manipulacji. Ponieważ roboty w całości lub części składające się z miękkich elementów stają się coraz bardziej popularne, uzyskały swoją nazwę własną: roboty miękkie (ang. *soft robots*). Należy jednak podkreślić, że studia nad miękkimi robotami zaczęły się jeszcze na przełomie lat 70. i 80. XX wieku [74], na długo zanim to określenie stało się popularne. Często inspiracja biologiczna [18] jest czynnikiem determinującym budowę robota (np. trąba słonia [16, 50], macki ośmiornicy [51], giętkie rośliny). Wszakże najpoważniejszymi problemami są sterowanie ruchem takich urządzeń oraz sposób ich wytwarzania (np. toczenie, frezowanie, spawanie czy gwintowanie nie wchodzą w rachubę). Raczej stosuje się druk 3D, naprzemienne nanoszenie materiału i obróbkę mechaniczną lub laserową, czy łączy włókna (np. węglowe) z elastycznym polimerem. Do wywoływania ruchu stosowane są elastomery dielektryczne, polimery ferroelektryczne, polimery ciekłokrystaliczne, polimery cechujące się pamięcią kształtu, polimery z wbudowanymi stopami zachowującymi pamięć kształtu, wszelkie konstrukcje pneumatyczne wykorzystujące różnicę ciśnień oraz wiele innych. Do tworzenia ciała często korzysta się z gum silikonowych. Zaletą robotów tego typu jest to, że mogą się wyginać w sposób ciągły, w odróżnieniu od ich sztywnych odpowiedników, które mają dyskretną liczbę stopni swobody. Ponadto robotom wykonanym z materiałów elastycznych łatwiej jest wniknąć do ciasnych i wąskich przestrzeni – są bardziej wszędobylskie. Miękkie materiały umożliwiają inkorporację zarówno czujników jak i siłowników, ale nie tych stosowanych w robotach sztywnych. Trudnością jest dostarczenie energii czujnikom stosowanym w robotach miękkich oraz przekazywanie informacji sterujących i zwrotnych. Miękkie roboty mogą się zginać, rozciągać, skręcać, być ściskane, pęcznieć, marszczyć się, no i dzięki temu, iż są to zmiany ciągłe, dysponują nieskończoną liczbą stopni swobody. Modele matematyczne robotów sztywnych są dość dobrze znane, natomiast tych miękkich są trudniejsze do opracowania, a co za tym idzie urządzenia te sprawiają większe problemy w sterowaniu. Częściej stosuje się sterowanie impedancyjne (podatnością mechaniczną materiału) niż sterowanie pozycyjne wykorzystywane w robotach sztywnych. Szczególną trudnością jest uzyskanie odpowiedniej precyzji ruchu, ale do pewnego stopnia jest to kompensowane podatnością, dzięki której manipulator jest w stanie dostosować się do chwytanego obiektu. Prace badawcze idą w kierunku zastosowania elektroniki rozciągliwej (*stretchable electronics*), która może być zespolona z ciałem robota miękkiego.

Szczególnie interesujące są chwytaki wykonane z miękkich komponentów. Zazwyczaj są to chwytaki nieantropomorficzne. W przypadku miękkich chwytaków głównym problemem jest uzyskanie jednocześnie: dużego zakresu ruchu, dużej siły uścisku oraz zdolności do szybkiej reakcji na sygnały sterujące. Do budowy chwytaków stosuje się materiały, których sztywność zależy od temperatury, materiały elektro- i magnetoreologiczne oraz granulaty, które twardnieją wskutek wyssania powietrza spomiędzy ziarenek oraz miękną przy wtłaczaniu powietrza między nie. Wyróżnia się trzy kategorie sposobów chwytania [67]:

a) generowanie ruchu (np. zaginanie palców bądź macek wokół obiektu wskutek deformacji wywołanej zmianą ciśnienia lub skracania cięgien),
b) zmiana sztywności (np. otaczanie obiektu miękkim chwytakiem, a następnie utwardzanie materiału, z którego jest skonstruowany) lub
c) zmiana przyczepności (np. przyssawki, elektromagnesy lub elektroadhezja).

Zastosowana metoda zależy od cech obiektu chwytanego: ciężar, gładkość powierzchni, jej czystość i kształt, podatność, kruchość, rodzaj materiału etc. Ta duża różnorodność technologii wskazuje, że chwytaki muszą być dobierane do rodzaju obiektów chwytanych. Niektóre ze wspomnianych metod są bardziej uniwersalne inne mniej. W miękkich chwytakach można inkorporować różnorodne czujniki, ale nie mogą one być tożsame z tymi stosowanymi w chwytakach zbudowanych z elementów sztywnych. Czujniki te muszą być elastyczne, a w szczególności rozciągliwe, ale można też stosować czujniki nieelastyczne, ale wtedy muszą być bardzo małe (np. MEMS). Nie ulega wątpliwości, że roboty kooperujące z ludźmi muszą być miękkie. Również

nie ulega wątpliwości, że chwytanie także wymaga podatności i bogatego oczujnikowania. Stąd intensywne badania w tej dziedzinie, ale systemy o możliwościach manipulacyjnych człowieka nadal są dość odległe.

2.2.5. Porozumiewanie się z robotami kompanami

Ludzie komunikując się ze sobą wykorzystują przede wszystkim mowę, ale istotna jest również mimika twarzy oraz gestykulacja [40]. Dla naturalnej interakcji, robot również musi przekazywać informację o swym stanie emocjonalnym przez odpowiedni wyraz twarzy. Chodzi tu o zestrojenie stanu emocjonalnego robota i człowieka. Prace w tym zakresie idą w dwóch kierunkach. Jednym jest jak najdokładniejsze odtworzenie wyglądu głowy ludzkiej, a drugim jest stworzenie sympatycznej artystycznej reprezentacji głowy, rodzaju kukiełki. Przykładem pierwszego podejścia są roboty Replee i Geminoid stworzone przez Hiroshi Ishiguro [33, 36], natomiast drugiego robot Flash stworzony na Politechnice Wrocławskiej [42]. W tym drugim przypadku istotnym jest, by twarz kukiełki była wystarczająco ekspresywna, aby przekazać bogactwo emocji, a co więcej, by te emocje były czytelne dla interlokutora – stąd jest to problem rodem ze sztuki tworzenia postaci animowanych, a więc mamy tu do czynienia ze stykiem nauk technicznych ze sztuką. Otwartym problemem badawczym z pogranicza robotyki i psychologii jest zdecydowanie, czy ludzie preferować będą sztucznych kompanów ściśle odwzorowujących ludzi czy wytwory artystyczne luźno przypominające człowieka, bądź wcale niepodobne do niego. Masahiro Mori wykrył dolinę niesamowitości lub osobliwości (ang. *uncanny valley*) [57]. Owa dolina występuje w wykresie odwzorowującym emocjonalną reakcję obserwatora na podobieństwo oglądanego obiektu do człowieka. Dolina jest związana z odpychającym wrażeniem, gdy podobieństwo obserwowanego obiektu do człowieka nie jest idealne, zarówno co do wyglądu, jak i zachowania. Ludzie wtedy stają się zaniepokojeni i wykazują odrazę. Wynika z tego, że początkowo, im większe podobieństwo robota do człowieka tym większa jego akceptacja, po czym następuje załamanie, które następnie przeradza się w nagłe zwiększenie akceptacji, gdy podobieństwo staje się idealne. Sugeruje to, że słabe repliki człowieka nie będą akceptowane przez ludzi. Natomiast David Hanson pokazał ranking akceptowalności obrazu dziewczyny, z którego wynika, że seria artystycznie odkształconych obrazów jej twarzy, poczynając od bardziej przypominających te z kreskówek, a kończąc na oryginalnym zdjęciu, wykazuje nieznacznie większą akceptowalność obrazów z kreskówek niż oryginału [35]. Sugeruje to brak wyraźnej doliny. Niemniej jednak te badania dotyczyły obrazu, a nie trójwymiarowego obiektu, z którym człowiek wchodzi w bezpośrednią interakcję. Generalnie obecnie uznaje się, że ludziom łatwiej wchodzi się w interakcje z robotami kompanami, jeżeli mają ludzki wygląd [15]. Co więcej nie tylko o wygląd tu chodzi, ale i to, że ta kategoria robotów działa w otoczeniu stworzonym dla ludzi, więc podobieństwo strukturalne ciał jest wskazane.

Obecny stan badań na styku robotyki i sztucznej inteligencji najlepiej obrazuje robot Sophia [1], z którym można prowadzić konwersację w języku angielskim. Robot nie tylko logicznie odpowiada na zadawane pytania, ale sensownie żartuje, utrzymuje kontakt wzrokowy z interlokutorem, a mimika twarzy i gesty rąk są zgodne z emocjami wywoływanymi konwersacją. Zrobił on, a tak naprawdę ona, tak duże wrażenie, że król Arabii Saudyjskiej zdecydował się jej nadać obywatelstwo swego kraju. Roboty o takich zdolnościach są niezbędne, by stać się kompanami dla ludzi, a w szczególności ludzi starszych. Odpowiadają one na istotne zapotrzebowanie społeczne, gdyż osoby starsze, bądź niepełnosprawne, często cierpią z powodu samotności oraz niemożności wykonywania prozaicznych czynności dnia codziennego. Taki robot mógłby być ich kompanem w życiu codziennym. Niestety Sophia zachowuje się sensownie jedynie, jeżeli wcześniej jej sterownik zostanie dostosowany do zakresu tematycznego rozmowy. Ułatwia to analizę rozmowy i wyodrębnienie danych, które umożliwiają doskonalenie odpowiedzi robota w przyszłości. Oprogramowanie stanowi zintegrowany system składający się z modułów opracowanych przez różne firmy, np. oprogramowanie rozpoznające mową opracowała firma Alphabet, syntezę mowy firma CereProc, a umiejętnością prowadzenia konwersacji i integracją zajęła się firma Hanson Robotics.

Architektura układu sterowania robota Sophia bazuje na oprogramowaniu OpenCog [30], umożliwiającym uczenie się i wnioskowanie, oraz na głębokich sieciach neuronowych. OpenCog stanowi programową strukturę ramową do tworzenia oprogramowania sztucznej ogólnej inteligencji (Artificial General Intelligence – AGI), w przyszłości mającej umożliwić tworzenie systemów o inteligencji porównywalnej do ludzkiej, a być może ją przewyższającą. Ogólna inteligencja jest rozumiana jako ogólnie efektywne zachowanie prowadzące do osiągnięcia celu dla nietrywialnych zadań wykonywanych w złożonych środowiskach. Ogólność wynika ze zdolności do wyszukania odpowiedniego zachowania wyrażanego poprzez program sterujący realizujący to zachowanie. Innymi słowy, ogólna inteligencja nie dotyczy realizacji pojedynczego zadania w ściśle określonym środowisku, np. prowadzenia rozgrywki szachowej, a raczej zdolności do poznania i zrozumienia świata w celu rozwiązywania całkiem nowych problemów [29, 31]. Prowadzi to do konstruowania samomodyfikowalnych systemów. Oczywiście chodzi o to, bo osiągnąć ogólnie inteligentne zachowania przy ograniczonych zasobach obliczeniowych.

Zastosowana w robocie Sophia architektura systemów kognitywnych powstała na bazie teorii ogólnej sztucznej inteligencji wykorzystanej do stworzenia OpenCogPrime. Założono, że systemy kognitywne będą współdziałały z oprogramowaniem odpowiedzialnym za: percepcję, wykonywanie czynności (akcji) oraz sterowanie i koordynację działania wymienionych tu podsystemów. Wykonywanie czynności obejmuje transformację zgrubnych planów otrzymanych z systemu kognitywnego w plany szczegółowe. Ogólna inteligencja ma wynikać z różnych sposobów przetwarzania wiedzy zgromadzonej we wskazanych rodzajach pamięci oraz zdolności do samoorganizacji systemu złożonego z agentów upostaciowionych [27]. Przyjęto, że wygodnym narzędziem matematycznym do reprezentowania wiedzy są hipergrafy. Ponadto założono interakcję systemu kognitywnego zbudowanego na bazie OpenCogPrime [28] z systemem bezpośrednio sterującym efektorami i receptorami robota. System kognitywny jest zdolny do analizy kontekstu oraz rozumienia celów stawianych przed robotem. Przyjęto że system kognitywny działa powoli, natomiast sterowanie bezpośrednie efektorami zdolne jest działać reaktywnie, a więc szybko reagować na pobudzenia od czujników. OpenCogPrime definiuje architekturę systemu w kategoriach komponentów wchodzących w interakcje ze sobą. Robi to na bazie teorii kognitywnej synergii [26], która postuluje, że ogólna inteligencja musi korzystać z mechanizmów tworzenia wiedzy wykorzystywanych przez różne rodzaje pamięci: deklaratywnej (przechowującej fakty), proceduralnej (zawierającej informacje, jak wykonywać czynności), sensorycznej (zawierającej dane uzyskane z czujników), epizodycznej (zawierającej sekwencje zdarzeń lub odczytów czujników), intencjonalnej (zawierającej wiedzę na temat celów systemu) i uwagi (określającej na czym warto skupiać uwagę w różnych okolicznościach). System musi mieć mechanizmy tworzenia zawartości poszczególnych rodzajów pamięci. Mechanizmy tworzenia i przetwarzania zawartości pamięci muszą być ze sobą odpowiednio zintegrowane by spowodować wyłonienie się inteligencji. System musi wiedzieć kiedy działać na podstawie posiadanej już wiedzy, a kiedy musi wytworzyć nową. To tworzenie nowej wiedzy traktowane jest jako proces kognitywny. Wskutek tych interakcji ma się wyłonić inteligentne zachowanie całości. W przypadku Sophii system kognitywny

jest przede wszystkim odpowiedzialny za prowadzenie inteligentnej konwersacji.

W Japonii prowadzone są prace badawcze mające odpowiedzieć na pytanie, co to znaczy być człowiekiem? Odpowiedzi na to pytanie poszukuje się nie tylko na gruncie nauk humanistycznych, ale również za pośrednictwem robotyki. Próba stworzenia maszyny imitującej człowieka powinna dać, przynajmniej częściowo, głębszą wiedzę o naturze człowieka i jego zachowaniach. Tym zagadnieniem zajmuje się Hiroshi Ishiguro, który stworzył całą rodzinę robotów łudząco przypominających ludzi (androidy) [34]. W szczególności zrobił replikę samego siebie (Geminoid HI-2). Jego roboty mają powłoki wykonane z pianki uretanowej oraz gumy silikonowej. Ze szczególną pieczołowitością oddano mimikę twarzy, więc rozmowa z tymi robotami sprawia wrażenie obcowania z żywym człowiekiem. Metalowy szkielet oraz miękka powłoka poruszane są siłownikami pneumatycznymi. Androidy te wyposażono w mikrofony, syntezatory mowy oraz kamery, dzięki czemu słyszą i widzą rozmówców. Profesor Ishiguro twierdzi, że stworzenie robotów wiernie imitujących ludzi ułatwi nam wchodzenie w interakcje społeczne z tymi maszynami. Oczywiście nie tylko wygląd musi być podobny, ale także zachowanie robota. Nasze mózgi są dostosowane do interakcji z innymi ludźmi, więc łatwiej nam wchodzić w relacje z człowiekiem niż z maszyną. Stąd chęć upodobnienia robotów do ludzi, szczególnie gdy wykonują zadania wymagające bezpośredniego obcowania z człowiekiem. Badanie, na ile istotny jest wygląd interlokutora w konwersacji z nim, ma ważne znaczenie nie tylko dla psychologii, ale również dla robotyki, szczególnie jeżeli chcemy, żeby roboty stanowiły atrakcyjnych kompanów dla osób samotnych. W komunikacji międzyludzkiej wyraz twarzy oraz gestykulacja, zaraz po tym, co mówimy, odgrywa bardzo istotną rolę. Tego samego będziemy wymagać od robotów kompanów. Braki w zdolnościach konwersacyjnych, wynikające z niedoskonałości programów sztucznej inteligencji, spowodowały przejście na teleoperację Geminoida, w celu określenia, na ile byłby on akceptowany przez ludzi, gdyby był inteligentniejszy. Początkowo androidy traktowano z rezerwą, ale po okresie przyzwyczajania, były akceptowane. Teleoperacja wymagała synchronizacji mimiki twarzy operatora i ruchów jego głowy z tymi Geminoida, do czego wykorzystywano kamerę rejestrującą obraz szyi i głowy człowieka. Po pewnym czasie operatorzy sygnalizowali, że mają odczucia, jakby znajdowali się w pomieszczeniu, w którym był Geminoid, do tego stopnia, że odczuwali dotyk, pomimo że robot nie był wyposażony w czujniki sił. Zapewne odgrywały tu rolę neurony lustrzane, które powodują czucie nie tylko, gdy jesteśmy dotykani, ale również wtedy, gdy jedynie widzimy, że tak jest.

Niemniej jednak celem było, i nadal jest, stworzenie autonomicznych robotów wchodzących w pozytywne interakcje z ludźmi. Ludzie mają różne upodobania, więc masowa produkcja identycznych robotów kompanów nie zadowoli wszystkich klientów. Wymagana będzie personalizacja robotów, co doprowadzi do ich indywidualizacji. To z kolei prowadzi do inżynierii cech osobowościowych robotów [47]. W wyniku tych badań powstał generatywny model osobowości kształtowany przez cele, dzięki któremu można uzyskać różne cechy osobowościowe robota. Innymi słowy, roboty o różnych osobowościach będą osiągały postawione cele na różne sposoby. Generatywny model osobowości umożliwia wytworzenie przy tym samym kontekście różnych zachowań robotów. Model ten stanowi archetyp, który jest różnicowany przez parametryzację. Przyjęto, iż robot działa według schematu Sense-Plan-Act, a indywidualizacja dotyczy jedynie planowania. Przy czym planowanie nie tylko określa zachowanie robota, ale również zmienia jego nastrój, więc w podobnej sytuacji robot może się zachować inaczej, ze względu na swoje aktualne usposobienie. Robota obdarzono trzema stopniowalnymi cechami osobowości: ekstrawertyczność/introwertyczność, ugodowość, skrupulatność (ang. *extraversion*, *agreeableness*, *conscientiousness*).

Nurt badań, w którym roboty i ludzie wchodzą w bezpośrednie interakcje, doprowadził do eksperymentów z wykorzystaniem robotów, ale nakierowanych na zrozumienie zachowań ludzkich. Przykładowo badano zdolność do synchronizacji rytmicznej z robotami humanoidalnymi [53]. Okazało się, że łatwiej jest człowiekowi zsynchronoizować swą grę na bębnie, z rytmem tworzonym przez eksperymentatora na drugim bębnie, jeżeli człowiek ten mógł obserwować grupę tańczących do tej muzyki robotów, niż wtedy, gdy widział i słyszał jedynie grę eksperymentatora. Ponadto poziom satysfakcji z uczestnictwa w eksperymencie wzrastał proporcjonalnie do liczby obserwowanych tańczących robotów. Eksperymenty tego typu wskazują, że możemy się dowiedzieć więcej nowego o zachowaniach człowieka, gdy wchodzi on w interakcje z robotami. Rodzi się nowa gałąź behawioryzmu, w której badane są interakcje człowiek–robot.

Prócz dążenia do stworzenia androida wiernie replikującego człowieka istnieje trend odwrotny, w którym celowo tworzy się głowy robotów ewidentnie mało przypominające ludzkie, niemniej jednak zdolne do wyrażania emocji. Przykładami robotów z takimi głowami są Kismet [14] i wspominany już wcześniej Flash z głową EMYS [41, 43]. Ten pierwszy, stworzony na MIT, za pomocą kamer i mikrofonów rozpoznawał stany emocjonalne interlokutora i dostosowywał się do nich, wyrażając swoje "uczucia" ruchem ust, brwi i odstających uszu, trochę jak to robią bohaterowie kreskówek. Emocje interlokutora rozpoznawane były dzięki obserwacji wyrazu twarzy oraz percepcji natężenia i tonu głosu. Artykulacja syntezatora mowy oraz wyraz twarzy Kismeta dostosowywały się do rozpoznanego stanu emocjonalnego rozmówcy. Natomiast głowa robota Flash składała się z trzech dysków oraz dwóch kul. Dyski były odseparowane od siebie, więc górny i dolny mogły odsuwać się od środkowego, a ruchome kule z kamerami przypominały oczy. Ten zabawny i estetycznie atrakcyjny wygląd przyciągał uwagę. Co więcej te minimalistyczne środki wyrazu okazały się wystarczające do wyrażania różnorakich emocji w trakcie rozmowy z ludźmi.

2.3. Roboty terenowe

Kategoria robotów terenowych obejmuje sobą bardzo szeroką grupę robotów. Roboty te mogą poruszać się po lądzie, na i pod wodą, ale i w powietrzu. Wyróżnikiem jest działanie w środowisku naturalnym, a więc w lasach, na polach, pod i na wodzie, w powietrzu. W tym ostatnim przypadku trudność stanowi nawigacja względem obiektów odniesienia znajdujących się na ziemi, no i oczywiście warunki pogodowe. Najbardziej rozwinięte są badania dronów wojskowych oraz samochodów autonomicznych.

2.3.1. Pojazdy autonomiczne

Badania nad autonomicznymi pojazdami dotyczą samochodów poruszających się zarówno po bezdrożach, jak i tych przemieszczających się po drogach publicznych, w tym i w ruchu miejskim. Intensywniejsze badania nad samochodami autonomicznymi rozpoczęto w latach 70. XX w. Prowadzono je w Japonii, Stanach Zjednoczonych i Niemczech. W 1986 r. zespół Ernsta Dickmannsa pokazał, jak pięciotonowa półciężarówka mercedes jeździ po pustych drogach [23]. W 1987 r. osiągnęła prędkość 96 km/h. W połowie lat 90. XX w. samochody wykorzystywane przez tę grupę osiągały już prędkości do 175 km/h, uczestnicząc w normalnym ruchu odbywającym się na autostradzie. Te osiągnięcia były możliwe głównie dzięki intensywnym badaniom nad percepcją, a w szczególności nad interpretacją sceny [22]. Analiza obrazów uzyskiwanych z otoczenia pojazdu w ruchu i przy innych pojazdach zasłaniających nieruchome tło jest istotnym wyzwaniem, szczególnie że musi się to odbywać w czasie rzeczywistym. Dlatego obecnie pojazdy autonomiczne wykorzystują tachometry do pomiaru prędkości i do odometrii, czujniki ultradźwiekowe do par-

kowania, a ponadto wyposażane są w dodatkowe czujniki wspomagające kamery, takie jak lidary, jednostki inercyjne czy GPS.

Na początku XXI wieku Amerykańska Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności DARPA (ang. *Defense Advanced Research Projects Agency*) zwróciła uwagę, że mimo inwestowania dużych środków finansowych w badania nad pojazdami autonomicznymi, ich postęp jest mizerny. Postanowiono więc zorganizować wyścig. Nazwano go DARPA Grand Challenge I. Odbył się w 2004 r. Zadaniem samochodów było samodzielne przejechanie trasy prowadzącej przez pustynne góry, a liczącej 227 km. Główną nagrodą był milion dolarów dla zespołu, którego pojazd dotrze do mety najszybciej. Okazało się to wyzwaniem ponad siły wszystkich uczestników. Najlepszy samochód pokonał niespełna 12 km. Pojazdy miały problemy z wykrywaniem przeszkód przez lidary i kamery w pustynnych warunkach oraz nawigowaniem na podstawie GPS. Słabe wyniki pierwszego wyścigu zdopingowały DARPA do ufundowania najlepszym zespołom grantów na rozwój ich pojazdów, podwojenia nagrody i zorganizowania w 2005 r. DARPA Grand Challenge II. Wynik był imponujący. Trasę 212 km pokonało 5 pojazdów, a Stanley (VW Tuareg) zrobił to w poniżej 7 godzin [69]. Problem autonomicznej nawigacji po gruntowych drogach i bezdrożach uznano za rozwiązany. Uwagę skoncentrowano na ruchu miejskim. W 2007 r. zorganizowano DARPA Urban Challenge. Zadaniem było poruszanie się autonomicznych pojazdów po drogach opuszczonego osiedla znajdującego się przy zlikwidowanej bazie lotniczej. Tor próbny miał około 100 km. Poruszały się po nim i w jego poprzek inne pojazdy – część autonomicznych, a część kierowana przez ludzi. Tym razem trzeba było przestrzegać reguł kodeksu drogowego. Na trasie przejazdu pojawiały się blokady wymagające zawracania, trzeba było omijać przeszkody, parkować, a ponadto prawidłowo się poruszać w deszczu lub we mgle. Z początkowych 35 pojazdów do finału dotarło 11. Trzy misje, które składały się na finał, ukończyło tylko sześć pojazdów. Pozostałe albo zawiesiły swoje działanie [61] albo uległy kolizjom [24]. Analiza jednej z kolizji wykazała, że w przypadku ludzkich kierowców ich kontakt wzrokowy odgrywa dominującą rolę przy powolnym ruchu samochodów. Natomiast w przypadku pojazdów autonomicznych problemem jest wyczucie intencji pozostałych uczestników ruchu, wykrywanie fantomowych przeszkód i nadmierna koncentracja na wykrywaniu i pozostaniu na pasie ruchu.

W większości przypadków pojazdy biorące udział w zawodach dokonywały syntezy danych z wielu czujników, by wytworzyć sobie trójwymiarowy model otoczenia w postaci probabilistycznej mapy zajętości, na podstawie której wnioskowały, jak się zachować. Ponadto brały pod uwagę zadaną globalną trasę przejazdu. Zawody wygrał zespół Tartan Racing z Carnegie Mellon University [71]. Pojazdy były wyposażone w kamery, lidary, radary i GPS. Należy zwrócić uwagę, iż początkowo do badań wykorzystywano wielkie samochody, by były w stanie pomieścić sprzęt sterujący. Z czasem sprzęt miniaturyzowano, więc wykorzystywane samochody stawały się coraz mniejsze. W 2018 r. firma BMW pokazała autonomiczny motocykl, który porusza się bez kierowcy po torze próbnym [11]. Badania te prowadzone są w celu poprawy bezpieczeństwa prowadzenia motocykli oraz lepszego zrozumienia dynamiki ich ruchu.

Rozwój technologii osiągnięty dzięki konkursom DARPA umożliwił stworzenie komercyjnej taksówki bez kierowcy – Waymo taxi [2]. Firma Waymo została założona w 2016 r. przez koncern Alphabet, właściciela Google. Sam Google zaczął prowadzić prace nad autonomicznymi pojazdami już w 2009 r. Skorzystano z wiedzy Sebastiana Thruna, który był szefem zwycięskiego zespołu z Grand Challenge II, oraz Anthonego Levandowskiego, szefa firmy 510 Systems, której sprzęt i oprogramowanie zostały wykorzystane do stworzenia Street View Googla. Waymo nie tylko opracowało oprogramowanie niezbędne do nawigacji w ruchu ulicznym, ale również odpowiednio tanie czujniki wykorzystywane w ich autonomicznych pojazdach. Powstały nowe lepsze i tańsze kamery i lidary. Ponadto wykorzystywane są radary, GPS oraz mikrofony. Te ostatnie do wykrywania sygnałów pojazdów uprzywilejowanych. Samochód dysponuje szczegółową mapą 3D terenu, po którym się porusza. Układy percepcyjne szczegółowo obrazują teren wokół samochodu. Porównanie danych uzyskanych z układu percepcji z mapą oraz z danymi uzyskanymi z GPS, jeżeli są dostępne, umożliwia precyzyjną lokalizację pojazdu. Dane z systemu percepcji służą również do określania sytuacji drogowej, a więc rejestrują informacje o ruchu pieszych, rowerzystów i pojazdów oraz znaki drogowe, zarówno pionowe, jak i poziome. Dane te służą do predykcji zachowania się innych pojazdów. W tym celu wykorzystywane są wcześniej wyuczone wzorce zachowań uczestników ruchu.

Zarówno systemy percepcji, jak i predykcji, wykorzystują głębokie sieci neuronowe do realizacji swych zadań. W tym celu skorzystano z doświadczeń zespołu Google Brain w stosowaniu biblioteki TensorFlow [5], przeznaczonej do implementacji głębokich sieci neuronowych i algorytmów uczenia maszynowego. Biblioteka ta, między innymi, umożliwia wykorzystanie procesora opracowanego przez Google na potrzeby sieci neuronowych – Tensor Processing Unit (tutaj tensor należy rozumieć jako wielowymiarową macierz). Wspomniane sieci neuronowe umożliwiają samochodowi podjęcie decyzji o własnym zachowaniu – konkretnie określenie parametrów ruchu. Dane zebrane w trakcie jazdy samochodu, o zachowaniu własnym i innych uczestników ruchu, są używane do uczenia systemu, a wiec polepszania zdolności autonomicznego kierowcy. Niemniej jednak większość pracy związanej z uczeniem sieci jest wykonywana z użyciem symulatora Carcraft odzwierciedlającego rzeczywiste środowisko, w którym poruszają się samochody w USA. 25 tysięcy symulowanych samochodów autonomicznych przejechało już miliardy kilometrów, by ich sieci neuronowe nauczyły się nimi bezpiecznie sterować [49].

Obecnie robot-taksówka klasyfikowany jest jako pojazd poziomu 4 SAE. Jego obsługa ogranicza się do czterech funkcji: rozpocznij jazdę, zjedź z drogi i się zatrzymaj, zamknij pojazd oraz pomoc. Od końca 2018 r; w Phoenix istnieje usługa Waymo One umożliwiająca skorzystanie z taksówki bez kierowcy [75]. W 2021 r. podobna usługę zaczęto testować w San Francisco, a obecnie testowana jest i w innych miastach USA. Samochody Waymo eksploatowane są w przyjaznych warunkach atmosferycznych, ale prowadzone są prace nad rozszerzeniem ich możliwości. Zdarzało im się uczestniczyć w drobnych kolizjach, ale prócz jednego przypadku wszystkie wypadki były zawinione przez ludzkich kierowców. Na marginesie, należy zauważyć, że pojawienie się taksówek bez kierowców w dobie pandemii, gdzie kontakty międzyludzkie muszą być ograniczone, wydaje się nie ekstrawagancją technologiczną, ale koniecznością. Oprócz Waymo nad autonomicznymi pojazdami pracują miedzy innymi: Tesla, GM, Ford, VW, Toyota, Volvo, BMW i Mercedes-Benz.

2.3.2. Roboty ratownicze

DARPA, zachęcona dobrymi wynikami uzyskanymi dzięki konkursom, zdecydowała się na zwiększenie ich liczby i rozszerzenie tematyki. Między innymi zorganizowano Robotics Challenge, rozegrany w latach 2012–2015. W tym przypadku chodziło nie tylko o kierowanie pojazdem, ale także o wykonywanie czynności w środowisku naturalnym, bądź stworzonym przez człowieka. Dalekosiężnym celem jest stworzenie robota, który mógłby brać udział w akcjach ratowniczych w przypadku katastrof. Reguły konkursu były następujące:

- Robot miał 60 minut na wykonanie wszystkich ośmiu zadań,
- Zdalny operator mógł postrzegać środowisko jedynie przez czujniki robota, a komunikacja z nim celowo nie była niezawodna, więc autonomia działania była preferowana,

– W przypadku upadku robot musiał radzić sobie samodzielnie,
– Interwencja ludzka kosztowała 10 min kary.

Natomiast wspomnianych osiem zadań to:
1) Prowadzenie samochodu przystosowanego do prowadzenia przez człowieka, ale nieposiadającego drzwi,
2) Wychodzenie z samochodu,
3) Otwieranie drzwi,
4) Otwieranie dużego zaworu,
5) Wiercenie otworu za pomocą wiertarki, którą zazwyczaj posługują się ludzie,
6) Przełączenie wyłącznika,
7) Przejście po rumowisku,
8) Wejście na schody (w pierwotnej wersji było to wspięcie się po drabinie, ale okazało się to zbytnim wyzwaniem dla robotów).

Zestaw zadań w zasadzie wymuszał, by w zawodach wzięły udział roboty humanoidalne lub dysponujące możliwościami ciała ludzkiego. Każde z zadań było wykonywane na innym stanowisku, więc roboty musiały się przemieszczać między nimi.

W zawodach brały udział 23 zespoły. Trzy drużyny wykonały wszystkie osiem zadań. Wygrał zespół z Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). Ich robot DRC-HUBO+ [44, 45] ukończył wykonanie wszystkich zadań w 44 minuty. 19 robotów wykonało co najmniej jedno zadanie. Szybkość wykonania wszystkich zadań wynikała m.in. z prędkości przemieszczania się między kolejnymi stanowiskami. Dużą prędkość zapewniły zwycięzcy napędzane koła zamontowana w kolanach i pasywne umieszczone na końcach palców stóp, co w pozycji klęcznej zamieniało robota w pojazd kołowy. Co więcej, ta pozycja jest bardziej stabilna niż stanie na stopach, co zapobiegało upadkom przy wykonywaniu zadań takich jak otwieranie drzwi. Wiele innych robotów korzystających jedynie z nóg wywracało się, a ponadto chód był o wiele wolniejszym sposobem przemieszczania się. Tu widać przewagę robotów o strukturze hybrydowej, dostosowanej do wymagań wykonywanych zadań.

Humanoidalny robot DRC-HUBO+ ma łącznie 32 stopnie swobody (w nogach po siedem, w rękach po osiem, w torsie i w szyi po jednym). Zarówno manipulatory, jak i nogi zaopatrzone są w czujniki sił i momentów sił, a ponadto robot wykorzystuje jednostkę inercyjną i żyroskop optyczny. Do goleni przymocowano czujniki przepływu optycznego rejestrujące ruch względny. Postrzeganie otoczenia zapewniały dwie kamery i lidar. Na podstawie danych z nich uzyskanych tworzone były chmury punktów, z których powstawał model 3D bezpośredniego otoczenia robota. Robot był zdalnie sterowany przez operatora. Ramiona wykorzystywały sterowanie pozycyjno-siłowe, natomiast do generacji chodu wykorzystano model robota w postaci odwróconego wahadła, a do sterowania wykorzystano prawo punktu zerowego momentu ZMP (ang. *Zero Moment Point*) [73, 76].

Wprawdzie roboty biorące udział w Robotics Challenge poruszały się na nogach cokolwiek niezdarnie, ale obecnie istnieją już maszyny kroczące wykazujące wysoką sprawność w tym względzie. Wytwarza je firma Boston Dynamics [4], która wyewoluowała z MIT Leg Lab. Boston Dynamics było finansowane głównie przez projekty realizowane na zamówienie DARPA. Rozpoczęło od czteronożnego robota Big Dog [64], o napędzie spalinowo hydraulicznym, który był w stanie poruszać się w bardzo zróżnicowanym terenie, a przeznaczeniem jego było wspomaganie żołnierzy w transporcie ciężkich ładunków.

MIT Leg Lab kontynuuje badania nad maszynami kroczącymi. Jednym z ich osiągnięć jest czteronożny robot Cheetah, który jest w stanie biec z prędkością 6,4 m/s (23 km/h) i przeskakiwać nad przeszkodami o wysokości do 40 cm, co stanowi 80 % długości nogi maszyny [12, 60]. Aktualnie prowadzone są prace badawcze umożliwiające takim maszynom na autonomiczne poruszanie się w zróżnicowanym terenie, co wymaga umiejętności planowania swego zachowania.

Natomiast najbardziej znanymi produktami Boston Dynamics są roboty Spot (maszyna czteronożna) oraz Atlas (humanoid). Wczesna wersja tego ostatniego była wykorzystywana przez wiele zespołów biorących udział w zawodach DARPA Robotics Challenge. Obecnie Atlas jest robotem elektryczno-hydraulicznym, ma 28 stopni swobody, może biec z prędkością 2,5 m/s, ma masę 89 kg i mierzy 1,5 m. Może poruszać się na nogach, lub dzięki rękom – za pomocą brachiacji, przeskakiwać przez przeszkody, a nawet wykonywać salta. Dzięki tym zdolnościom ruchowym może pokonywać parkur. Mimo to w 2022 r. rekord prędkości w kategorii bipedów należał do robota Cassie/Digit podobnego do strusia, a skonstruowanego przez Agility Robotics oraz Oregon State University, i wynosił 24,7 km/h (około 6,9 m/s) [7].

Natomiast Spot jest najnowszym czteronogim w długiej linii takich robotów opracowanych przez Boston Dynamics. Jednym z nich był WildCat, który biegał z prędkością 32 km/h wykonując takie manewry, jak zawracanie w biegu. Spot może być wyposażony w manipulator. Jest zdolny do czołgania się, potrafi podnieść się po upadku. Otwiera drzwi zamknięte na klamkę. Zarówno Atlas jak i Spot zostały skomercjalizowane i przeznaczone są do prowadzenia badań w laboratoriach, więc dostarczane są z odpowiednimi bibliotekami oprogramowania ułatwiającymi realizację różnorodnych zadań. Badania te głównie dotyczą autonomicznych zachowań i prowadzenia misji w zróżnicowanym terenie.

Kolejnym wyzwaniem dla robotów terenowych był konkurs zaplanowany przez DARPA na lata 2018–2021 – Subterranean Challenge (SubT) [20]. Tym razem celem było stworzenie robotów, które asystowałyby przy operacjach ratowniczych w kopalniach, budynkach zawalonych przez trzęsienia ziemi etc. Istotną funkcją robotów była zdolność do tworzenia wolumetrycznych map 3D terenu poszukiwań i przekazywania ich sędziom w czasie rzeczywistym. Założono, że roboty nie będą przekształcały terenu, w którym się poruszają. Konkurs miał dwie odmiany: 1) dla rzeczywistych robotów operujących pod ziemią (zawody dla systemów rzeczywistych) i 2) dla robotów symulowanych operujących w świecie wirtualnym (zawody wirtualne). W obu odmianach wyróżniono trzy rodzaje środowisk (dziedzin): naturalne jaskinie, tunele bądź sztolnie oraz podziemia budynków. We wszystkich przypadkach korytarze mogły być poziome, nachylone lub stanowić pionowe szyby. Teren mógł być błotnisty lub zawierać cieki wodne oraz być zagruzowany, a widoczność mogła być ograniczona. Trzeba było też wziąć pod uwagę ruchome przeszkody związane z osuwaniem się terenu. Ponadto zakładano, że nie wszędzie będzie istniała łączność radiowa, więc roboty musiały być przygotowane do działania autonomicznego. Zadaniem było znalezienie i zlokalizowanie wskazanych obiektów (np. ludzi, kratek wentylacyjnych, telefonów komórkowych, gaśnic, hełmów, plecaków, wiertarek na baterie) z dokładnością do 5 m. Należy zauważyć, że dodatkową trudnością był tu brak możliwości skorzystania z GPS. Drużyny nie były wpuszczane na teren, w którym operowały roboty ani w trakcie zawodów ani przed nimi, więc w pełni musiały polegać na percepcji swych robotów. Dopuszczono jednego operatora robota, który mógł się z nim kontaktować jedynie drogą radiową, niemniej jednak zakładano, że robot będzie wykonywał zadanie autonomicznie, chociażby dlatego że łączność radiowa mogła być zerwana. Najistotniejszym kryterium oceny była prawidłowa identyfikacja i lokalizacja obiektów, natomiast czas wykonania pojedynczego przejazdu trasy był ograniczony do 60 minut.

Zawody SubT w kategorii rzeczywistych systemów wygrał międzynarodowy zespół CERBERUS [70], który skorzystał z systemu wielorobotowego składającego się z czteronożnych maszyn kroczących ANYmal B wytwarzanych przez szwajcarską firmę ANYbotics, dronów czterowirnikowych DJI M100

oraz mobilnego robota kołowego. Komunikację z operatorem zapewniło pozostawianie na swej drodze małych stacji łączności radiowej (WiFi Breadcrumbs). Wyzwanie stanowiło zbudowanie mapy otoczenia na podstawie danych pochodzących z wielu niezależnych źródeł (czujników zamontowanych na różnych robotach). Maszyny kroczące wykorzystywały kamery (światła widzialnego i podczerwieni), jednostki inercyjne i lidary, natomiast drony: kamery podczerwieni, lidary i jednostki inercyjne. Jeden z dronów otoczony był ażurową klatką dającą mu odporność na zderzenia. Ponadto wykorzystywano jednego robota kołowego o dużym udźwigu, który zapewniał łączność. Był on połączony z ze stacją operatora systemu za pomocą światłowodu. Sukces zapewniła synteza danych uzyskiwanych z szybkiego drona oraz z pokładowych czujników maszyny kroczącej. System wykorzystywał lokalny planer do określenia zachowania robota w niewielkiej odległości od aktualnej jego pozycji oraz globalny planer do określenia sposobu ruchu w celu realizacji całego zadania. Systemowi udało się zlokalizować 23 spośród wymaganych 40 obiektów.

2.3.3. Roboty rolnicze

Równolegle do prac nad autonomicznymi pojazdami oraz zwiększaniem możliwości robotów wykonujących misje ratownicze prowadzono badania nad robotami rolniczymi, w szczególności wspomagającymi rolnictwo precyzyjne (ang. *precision agriculture*) [13, 32]. Motywacją do prowadzenia tych badań jest nie tylko brak rąk do prac sezonowych, ale również spostrzeżenie, iż liczba ludności Ziemi wzrasta, natomiast jej zasoby nie. Wykarmienie zwiększającej się populacji wymaga przede wszystkim zmniejszenia marnotrawstwa, a więc zmniejszenia zużycia wody, nawozów i pestycydów. Innymi słowy, chodzi o precyzyjniejsze gospodarowanie zasobami, a w tym lepsze są maszyny niż ludzie.

Rolnictwo precyzyjne, dzięki zaawansowanym technikom pomiarowym, umożliwia dostarczanie roślinom niezbędnej ilości wody i nawozów we właściwym momencie. Umożliwia też walkę ze szkodnikami we właściwy sposób i we właściwym okresie. Okazało się, że roboty w istotny sposób mogą wspomóc ten sposób uprawy roślin. Ponieważ podstawą rolnictwa precyzyjnego są pomiary, do ich wykonywania używa się satelity, drony oraz roboty mobilne. Satelity są drogie, dostarczają informacji niskiej rozdzielczości oraz mają problemy, gdy niebo jest pochmurne. Drony dostarczają informacji o wyższej rozdzielczości, ale nie na tyle dużej, by można było tylko na niej bazować. Oczywiście zarówno satelity, jak i drony, dostarczają informacji o znacznym areale. Natomiast pojazdy są w stanie uzyskać pomiary dużo precyzyjniejsze, ale na obszarze dużo mniejszym. Stąd często korzysta się z obu rodzajów robotów wspólnie. Do dokonywania pomiarów wykorzystuje się przede wszystkim kamery światła widzialnego i podczerwonego i lidary. Na podstawie tych pomiarów określa się mapy terenu wskazujące nawodnienie gleby i jej pH oraz stan roślin, tudzież ilość biomasy jak i spodziewane plony. Na podstawie odpowiedzi spektralnej roślin można ocenić w nich deficyt azotu, zawartość chlorofilu, stopień opanowania przez szkodniki czy nawodnienie roślin. Do badania stanu gleby roboty mobilne wykorzystują czujniki rezystancji i indukcji elektrycznej oraz georadary. Do lokalizacji i omijania przeszkód roboty naziemne zazwyczaj wykorzystują GPS oraz sonary.

Roboty są używane nie tylko do wykonywania pomiarów, ale po ich przetworzeniu do wykonywania zabiegów agrotechnicznych oraz do zbierania plonów. Ogólnie roboty używanie są do sadzenia, przesadzania, usuwania chwastów, precyzyjnego nawożenia i nawadniania, dokonywania oprysków oraz zbierania plonów. Szczególnie wykorzystanie robotów w sadownictwie jest przedmiotem zainteresowania. Przykładowo opracowano prototyp do zbierania jabłek [39]. Roboty też są wykorzystywane do zbierania truskawek i pomidorów, ale wtedy rośliny te są uprawiane w taki sposób, by owoce zwisały, tak aby można je było łatwo odciąć [63]. Chodzi o to, by nie chwytać miękkich owoców, które łatwo uszkodzić. Owoce muszą znajdować się nad podłożem, więc często stosuje się specjalne stelaże. Jest to raczej rozwiązanie dla szklarni niż dla upraw polowych. Wprawdzie obecne roboty zbierają owoce wolniej, ale mogą pracować bez odpoczynku całodobowo, siedem dni w tygodniu. Wykorzystywane przez nie algorytmy percepcji, nawigacji oraz planowania czynności wymagają użycia technik sztucznej inteligencji.

Firma Alphabet (właściciel Google) prowadzi projekt Mineral, który ma wytworzyć narzędzia sprzętowe i oprogramowanie, które umożliwią głębsze poznanie zasad wydajnego sposobu uprawy roślin [3, 68]. Naukowcy usiłują zgłębić zasady, którymi rządzi się wzrost roślin oraz jak rośliny wchodzą w interakcje ze swym otoczeniem. Jednym z narzędzi badań są roboty mobilne zbierające dane o roślinach. Dane zebrane za pomocą robotów w połączeniu z wiedzą dotyczącą genetyki roślin, zdjęciami satelitarnymi oraz tymi uzyskanymi z dronów, przetworzone za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji mają umożliwić określenie optymalnych warunków nie tylko dla danego rodzaju roślin, ale również dla indywidualnych reprezentantów rosnących na konkretnym polu. W szczególności zespół Mineral bada, w jaki sposób minerały uwalniane są w glebie przez bakterie, a następnie jak wchłaniane są przez rośliny. Jest to istotne, gdyż wiele minerałów potrzebnych nam do życia nasz organizm nie jest w stanie samodzielnie syntezować – musi je pozyskać z jedzenia. Z 30 tysięcy znanych roślin jadalnych ludzie wykorzystują do jedzenia mniej niż 1 %. Projekt ma za zadanie zwiększyć różnorodność używanej żywności, a przez dywersyfikację zredukować monokultury, a w konsekwencji zmniejszyć podatność roślin na choroby.

Przedmiotem badań projektu Mineral są uprawy na całym świecie. W tym ambitnym celu roboty i sztuczna inteligencja odgrywają kluczową rolę. Wykorzystywana rodzina robotów wykorzystuje napędy elektryczne zasilane z pokładowych paneli fotowoltaicznych. Położenie robota określane jest za pomocą czujnika GPS. Różnorodne kamery wysokiej rozdzielczości stosowane są do badania cech indywidualnych roślin. To służy wskazaniu tych, które są szczególnie predystynowane do dalszego rozmnażania.

Ciekawym jest, że pierwotnie roboty miały służyć ułatwieniu uprawiania roślin – wyręczyć w tym ludzi, a projekt Mineral pokazuje, że są stosowane również do ułatwienia zgłębiania tajników biologii. W miarę zwiększania się możliwości ruchowych i percepcyjnych tych urządzeń zakres ich zastosowań będzie się niechybnie rozszerzał.

3. Podsumowanie

Możliwości robotów przemysłowych stale wzrastają. Przekłada się to na mnogość ich zastosowań. Widać tu duży wpływ inkorporacji nowych czujników, co zwiększa elastyczność działania tych urządzeń. Ciekawym jest trend zapożyczania technologii stosowanych w robotach usługowych. Dzięki temu powstały koboty, które w istotny sposób zmieniły sposób instalowania robotów w przemyśle. Rezygnuje się ze ścisłego wygrodzenia tych maszyn na rzecz umożliwienia im bezpośredniej interakcji z ludźmi. Należy się spodziewać, że ten trend zostanie utrzymany. Oczywiście nie należy się spodziewać, że klasyczne roboty przemysłowe znikną. Tam gdzie z sukcesem wykonują swoją pracę, nadal będą stosowane. Intrygujące jest, że w przemyśle zdobycze sztucznej inteligencji nie są wykorzystywane w istotny sposób.

Natomiast konstruktorzy robotów usługowych czerpią z osiągnięć sztucznej inteligencji pełnymi garściami. Związane jest to z koniecznością korzystania z rozbudowanych układów percepcyjnych dostarczających mnogości danych z różnorodnych czujników. Rozpoznawanie obrazów, analiza mowy oraz jej syn-

teza, a nadto planowanie wymagają wykorzystania różnych form sztucznej inteligencji. Dużą popularnością cieszą się sieci neuronowe, ale ich wadą jest trudność w wyjaśnieniu, czemu wytworzony rezultat ich działania jest właśnie taki, jaki jest. Tej wady nie mają systemy wnioskujące oparte na logice. Niestety opis świata za pomocą formuł logicznych nie jest sprawą łatwą. Dotychczas opracowane ontologie są dalekie od potrzeb. Najczęściej operuje się tu uproszczoną wizją świata, co nie gwarantuje, że skutki działania robota w rzeczywistości będą takie, jak zaplanowano. Prace nad sztuczną ogólną inteligencją są jeszcze na dość wczesnym etapie. Jak widać, mimo ogromnego postępu w dziedzinie sztucznej inteligencji wiele pozostaje do zrobienia, a niezbędne rozwiązania nie są oczywiste, tak że dalsza droga pozostaje niewytyczona.

Przyglądając się postępom, jakie robotyka poczyniła dzięki konkursom DARPA, należy zwrócić uwagę na kilka elementów. Wpierw skoncentrowano się na środowisku pustynnym, a więc bez postronnych ludzi, oraz samochodach, a więc na dojrzałej już technologii. Najistotniejszymi elementami były percepcja i podejmowanie decyzji o przyszłym zachowaniu samochodu. Następnie środowisko stało się bardziej wymagające. W ruchu miejskim uczestniczą ludzie, a ich bezpieczeństwo jest najistotniejsze. W następnym kroku uwagę przesunięto ze zdolności do przemieszczania się w różnorodnych warunkach na zdolności manipulacyjne. Wreszcie w konkursie SubT powrócono do pojazdów, ale już nie samochodów. Co więcej środowisko musiało być postrzegane w sztucznym świetle i, co istotne, mogło być zadymione. Wymagania narzucone na systemy percepcyjne były o wiele wyższe. Ponadto zadanie wymagało użycia systemów wielorobotowych, w skład których wchodziły nie tylko pojazdy kołowe, ale również maszyny kroczące i drony. Uwaga została przeniesiona na współdziałanie wielu robotów o różnych możliwościach. Podejmowanie decyzji w takich systemach wymaga jeszcze bardziej rozwiniętej sztucznej inteligencji. Poleganie na sztywno określonych regułach działania (działanie proceduralne) jest tu mało skuteczne.

Jak widać z powyższej analizy, stopniowo dąży się do zwiększenia autonomii działania robotów, a to jest nierozerwalnie związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w oprogramowaniu układów sterowania tymi urządzeniami. Jest ona wykorzystywana przede wszystkim w układach percepcji, gdzie istotną rolę odgrywają sieci neuronowe, oraz do planowania, gdzie najczęściej wykorzystuje się przeszukiwanie albo przestrzeni stanów albo przestrzeni zadań. Ta integracja sztucznej inteligencji i robotyki dokonywała się krokami, ale obecnie nie da się omawiać wpływu robotów na społeczeństwo w oderwaniu od wpływu na nie sztucznej inteligencji.

Wprawdzie postęp w pracach nad autonomią robotów oraz zwiększeniem ich inteligencji jest imponujący, ale albo są one dostosowane do konkretnego typu środowiska albo są wspomagane przez ludzkiego operatora. Nie tylko cielesność ich powłoki jest tu przeszkodą, ale przede wszystkim ich zdolności intelektualne. Niektóre parametry ich ruchu są już zbliżone do ludzkich, np. prędkość poruszania się, ale wtedy inne parametry wtedy bywają daleko w tyle. Przykładowo nie istnieje humanoid, który potrafiłby pływać. Wszakże należy oczekiwać dalszego postępu, szczególnie jeżeli skorzysta się z rozwiązań stosowanych w miękkich robotach. Natomiast, znów pomimo istotnych postępów w dziedzinie sztucznej inteligencji, czeka roboty jeszcze długa droga nim osiągną poziom inteligencji zbliżony do ludzkiej.

Należy zwrócić uwagę na to, że istotny postęp w badaniach nad robotami i sztuczną inteligencją jest obecnie czyniony nie tylko w instytucjach akademickich, ale w firmach i to nie tylko tych, których podstawową formą działalności jest produkcja robotów. Ponadto wiele instytucji finansujących naukę oraz koncernów międzynarodowych od wielu lat organizuje konkursy, których zadaniem jest skoncentrowanie uwagi zespołów badawczych lub kół naukowych na nierozwiązanych istotnych problemach robotyki. Zapewne fundowanie nagród jest efektywniejsze finansowo niż fundowanie grantów na proponowane przez wnioskodawców projekty. Oczywiście walka o nagrodę zakłada, że zespoły partycypujące w konkursie są dostatecznie bogate, by sfinansować swoje projekty. Ponieważ takie założenie w wielu przypadkach nie bywa prawdziwe, stosuje się preselekcję, a zespołom, które zademonstrują doskonałość swej propozycji, funduje się grant na jej realizację. Wysoka nagroda pieniężna oczywiście jest dodatkowym bodźcem, ale liczy się też prestiż zdobyty dzięki wygranej.

Bibliografia

1. *Hanson Robotics Company Overview.* www.hansonrobotics.com/wpcontent/uploads/2017/02/Hanson-Robotics-Overview.pdf, 2017.
2. *Waymo safety report: On the road to fully self-driving.* https://storage.googleapis.com/sdc-prod/v1/safetyreport/waymo-safety-report-2017.pdf, 2017.
3. *Alphabet X Mineral.* https://x.company/projects/mineral/, 2022.
4. *Boston dynamics.* www.bostondynamics.com/resources/casestudies, 2022.
5. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Irving G., Isard M., Kudlur M., Levenberg J., Monga R., Moore S., Murray D.G., Steiner B., Tucker P., Vasudevan V., Warden P., Wicke M., Yu Y., Zheng X., *TensorFlow: A system for Large-Scale machine learning.* 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16), Savannah, GA, November 2016. 265–283, USENIX Association.
6. Ackerman E., *For Better or Worse, Tesla Bot Is Exactly What We Expected; Tesla fails to show anything uniquely impressive with its new humanoid robot prototype.* „IEEE Spectrum Analysis", October 1 2022.
7. Ackerman E., *Robo-Ostrich Sprints to 100-meter World Record; Oregon State University's Cassie is fastest bipedal robot ever to run the 100-meter dash.* „IEEE Spectrum News", September 28 2022.
8. Adolphe M., Clerval J., Kirchof Z., Lacombe-Delpech R., Zagrodny B., *Center of mass of human's body segments.* „Mechanics and Mechanical Engineering", Vol. 21, No. 3, 2017, 485–497.
9. Badger J.M., Hulse A., Thackston A., *Advancing safe human-robot interactions with robonaut 2,* 12th International Symposium on AI, Robotics and Automation in Space.
10. Baker W., Kingston Z., Moll M., Badger J., Kavraki L., *Robonaut 2 and you: Specifying and executing complex operations.* IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), March 8–10 2017, DOI: 10.1109/ARSO.2017.8025204.
11. Blain L., *Riderless BMW R1200GS eerily makes its way around a test track.* „New Atlas", September 11 2018.
12. Bledt G., Powell M., Katz B., Carlo J., Wensing P., Kim S., *Mit cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot.* 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 1–5 2018, 2245–2252, 10.1109/IROS.2018.8593885.
13. Botta A., Cavallone P., Baglieri L., Colucci G., Tagliavini L., Quaglia G., *A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture.* „Applied Mechanics", Vol. 3, No. 3, 2022, 830–854, DOI: 10.3390/applmech3030049.
14. Breazeal C., *Emotion and sociable humanoid robots.* „International Journal of Human-Computer Studies", Vol. 59, No. 1-2, 2003, 119–155, DOI: 10.1016/S1071-5819(03)00018-1.
15. Brooks R., *I, Rodney Brooks, am a robot.* „IEEE Spectrum", Vol. 45, No. 6, 2008, 60–67, DOI: 10.1109/MSPEC.2008.4531466.

16. Cieślak R., Morecki A., *Elephant trunk type elastic manipulator – a tool for bulk and liquid materials transportation.* „Robotica", Vol. 17, No. 1, 1999, 11–16, DOI: 10.1017/S0263574799001009.
17. Colling D., Dziedzitz J., Furmans K., Hopfgarten P., Markert K., *Progress in autonomous picking as demonstrated by the amazon robotic challenge.* Proceedings 15th International Material Handling Research Colloquium (IMHRC), July 24–26 2018.
18. Coyle S., Majidi C., Leduc P., Hsia K., *Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design.* „Extreme Mechanics Letters", Vol. 22, 2018, 51-59, DOI: 10.1016/j.eml.2018.05.003.
19. Critchlow A., *Introduction to Robotics.* Macmillan, New York, 1985.
20. DARPA. *DARPA subterranean challenge: Competition rules – final event.* Defense Advanced Research Projects Agency Tactical Technology Office, May 25 2021.
21. Das B., Wang Y., *Isometric pull-push strengths in workspace: 1. strength profiles.* „International Journal of Occupational Safety and Ergonomics", Vol. 10, No. 1, 2004, 43–58, DOI: 10.1080/10803548.2004.11076594.
22. Dickmanns E., *Dynamic Vision for Perception and Control of Motion.* Springer, London, 2007.
23. Dickmanns E., Zapp A., *Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision.* „IFAC Proceedings Volumes", Vol. 20, No. 5, 1987, 221–226, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)55320-3.
24. Fletcher L., Teller S., Olson E., Moore D., Kuwata Y., How J., Leonard J., Miller I., Campbell M., Huttenlocher D., Nathan A., Kline F.R., *The MIT-Cornell collision and why it happened.* „Journal of Field Robotics", Vol. 25, No. 10, 2008, 775–807, DOI: 10.1002/rob.20266.
25. Gillespie R., Colgate J., Peshkin M., *A general framework for cobot control.* „IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 17, No. 4, 2001, 391–401, DOI: 10.1109/70.954752.
26. Goertzel B., *Cognitive synergy: A universal principle for feasible general intelligence.* 8th IEEE International Conference on Cognitive Informatics, 2009, 464–468, DOI: 10.1109/COGINF.2009.5250694.
27. Goertzel B., *The Embodied Communication Prior: A characterization of general intelligence in the context of Embodied social interaction.* 8th IEEE International Conference on Cognitive Informatics, 2009, 38–43, DOI: 10.1109/COGINF.2009.5250687.
28. Goertzel B., *OpenCogPrime: A cognitive synergy based architecture for artificial general intelligence.* 8th IEEE International Conference on Cognitive Informatics, 2009, 60–68, DOI: 10.1109/COGINF.2009.5250807.
29. Goertzel B., *From abstract agents models to Real-World AGI architectures: Bridging the gap.* T. Everitt, B. Goertzel, A. Potapov, red. *Artificial General Intelligence*, Springer International Publishing, 2017, 3–12.
30. Goertzel B., Hanson D., Yu G., *A software architecture for generally intelligent humanoid robotics.* „Procedia Computer Science", Vol. 41, 2014, 158–163, DOI: 10.1016/j.procs.2014.11.099.
31. Goertzel B., Monroe E., *Toward a general model of human-like general intelligence.* „Common Model of Cognition Bulletin", Vol. 1, No. 2, 2017, 344–347.
32. Griffin T., Yeager E., *Adoption of precision agriculture technology: A duration analysis.* Proceedings of 14th International Conference on Precision Agriculture, International Society of Precision Agriculture, June 24–27 2018, 1–14.
33. Guizzo E., *Hiroshi Ishiguro*: *The man who made a copy of himself.* „IEEE Spectrum", Vol. 47, 2010, 40–44.
34. Guizzo E., *The Man Who Made a Copy of Himself: Hiroshi Ishiguro is Building Androids to Understand Humans – Starting with Himself.* IEEE Spectrum, Vol. 52, 2010, 40–44.
35. Hanson D., Olney A., Pereira I.A., Zielke M., *Upending the uncanny valley.* Proceedings 20th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI '05, 1728–1729.
36. Ishiguro H., Nishio S., *Building artificial humans to understand humans.* „Journal of artificial organs: the official journal of the Japanese Society for Artificial Organs", Vol. 10, No. 3, 2007, 133–142, DOI: 10.1007/s10047-007-0381-4.
37. Jacobsen S., Iversen E., Knutti D., Johnson R., Biggers K., *Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand.* Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, 1986, 1520–1532, DOI: 10.1109/ROBOT.1986.1087395.
38. Jezierski E., *Dynamika robotów.* Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT, Warszawa, 2006.
39. Kang H., Zhou H., Chen C., *Visual perception and modeling for autonomous apple harvesting.* „IEEE Access", Vol. 8, 2020, 62151–62163, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984556.
40. Kasprzak W., *Rozpoznawanie obrazów i sygnałów mowy.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
41. Kędzierski J., Janiak M., *Budowa robota społecznego FLASH.* K. Tchoń, C. Zieliński, red., *Postępy robotyki*, XII Krajowa Konferencja Robotyki, Świeradów Zdrój, 12–16 września 2012, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Elektronika, Vol. 182, 2012, 681–694.
42. Kędzierski J., Kaczmarek P., Dziergwa M., Tchoń K., *Design for a robotic companion.* „International Journal of Humanoid Robotics", Vol. 12, No. 1, 2015, 1–24, DOI: 10.1142/S0219843615500073.
43. Kędzierski J., Muszyński R., Zoll C., Oleksy A., Frontkiewicz M., *EMYS—emotive head of a social robot.* „International Journal of Social Robotics", Vol. 5, 2013, 237–249, DOI: 10.1007/s12369-013-0183-1.
44. Lim J., Bae H., Oh J., Lee I., Shim I., Jung H., Joe H.M., Sim O., Jung T., Shin S., Joo K., Kim M., Lee K., Bok Y., Choi D.-G., Cho B., Kim S., Heo J., Kim I., Lee J., Kwon I.S., Oh J.-H., *Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals.* M. Spenko, S. Buerger, K. Iagnemma, (red.), *The DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots To The Rescue*, 27–69, Cham, 2018. Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-74666-1_2.
45. Lim J., Lee I., Shim I., Jung H., Joe H., Bae H., Sim O., Oh J., Jung T., Shin S., Joo K., Kim M., Lee K.K., Bok Y., Choi D.-G., Buyoun C., Kim S., Heo J., Kim I., Lee J., Kwon I.S., Oh J.-H., *Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals.* „Journal of Field Robotics", Vol. 34, No. 4, 2017, 802–829, DOI: 10.1002/rob.21673.
46. Long Z., Jiang Q., Tao S., Wen F., Liang C., *A systematic review and meta-analysis of robotic gripper.* „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", Vol. 782, 2020, DOI: 10.1088/1757-899X/782/4/042055.
47. Luo L., Ogawa K., Peebles G., Ishiguro H., *Towards a personality AI for robots: Potential colony capacity of a goal-shaped generative personality model when used for expressing personalities via non-verbal behaviour of humanoid robots.* „Frontiers in Robotics and AI", 2022, DOI: 10.3389/frobt.2022.728776.
48. Lutz W., Sanderson W., Scherbov S., *The coming acceleration of global population ageing.* „Nature", Vol. 451, No. 7179, 2008, 716–719.

49. Madrigal A., *Inside waymo's secret world for training self--driving cars – an exclusive look at how alphabet understands its most ambitious artificial intelligence project*. „The Atlantic", August 23 2017.
50. Malczyk G., Morecki A., *A mathematical model of a flexible manipulator of the elephant's-trunk-type*. RoManSy 6: Proceedings of the 6th CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, 1987, 198–206, Springer US.
51. Margheri L., Laschi C., Mazzolai B., *Soft robotic arm inspired by the octopus: I. From biological functions to artificial requirements*. „Bioinspiration & Biomimetics", Vol. 7, No. 2, 2012, DOI: 10.1088/1748-3182/7/2/025004.
52. Melchiorri C., Kaneko M., *Robot Hands*, [In:] *The handbook of robotics*. 2016, 463–480, DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_16.
53. Meneses A., Yoshikawa Y., Ishiguro H., *Effect of synchronous robot motion on human synchrony and enjoyment perception*. „Interaction Studies", Vol. 22, No. 1, 2021, 86–109, DOI: 10.1075/is.18027.men.
54. Mianowski K., *Functional characteristics of a new special gripper with flexible fingers*. „Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems", Vol. 5, No. 3, 2011.
55. Mianowski K., Berns K., Hirth J., *The artificial hand with elastic fingers for humanoid robot ROMAN*. 18th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2013, 448–453, DOI: 10.1109/MMAR.2013.6669950.
56. Moore C., Peshkin M., Colgate J., *Cobot implementation of Virtual Paths and 3D Virtual Surfaces*, „IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 19, No. 2, 2003, 347–351, DOI: 10.1109/TRA.2003.808866.
57. Mori M., *The uncanny valley*. „IEEE Robotics and Automation Magazine", 2012, 98–100.
58. Morrison D., Tow A., McTaggart M., Smith R., Kelly-Boxall N., Wade-McCue S., Erskine J., Grinover R., Gurman A., Hunn T., Lee D., Milan A., Pham T., Rallos G., Razjigaev A., Rowntree T., Vijay K., Zhuang Z., Lehnert C., Leitner J., *Cartman: The low-cost cartesian manipulator that won the amazon robotics challenge*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018, 7757–7764, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8463191.
59. Munson G., *The rise and fall of Unimation Inc. – story of robotics innovation & triumph that changed the world*, Robot Magazine, December 2010.
60. Park H., Wensing P.M., Kim S., *Jumping over obstacles with MIT Cheetah 2*. „Robotics and Autonomous Systems", Vol. 136, 2021, DOI: 10.1016/j.robot.2020.103703.
61. Patz B., Papelis Y., Pillat R., Stein G., Harper D., *A practical approach to robotic design for the DARPA Urban Challenge*. „Journal of Field Robotics", Vol. 25, No. 8, 2008, 528–566, DOI: 10.1002/rob.20251.
62. Peshkin M.A., Colgate J.E., Wannasuphoprasit W., Moore C.A., Gillespie R.B., Akella P., *Cobot architecture*. „IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 17, No. 4, 2001, 377–390, DOI: 10.1109/70.954751.
63. Petrovic K., *Picking Robots Address Agriculture's Labor Shortage Challenge*. „Robotics Business Review", November 5, 2020.
64. Raibert M.H., Blankespoor K., Nelson G.M., Playter R., *BigDog, the rough-terrain quadruped robot*. „IFAC Proceedings Volumes", Vol. 41, No. 2, 2008, 10822–10825, DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833.
65. Rus D., Tolley M., *Design, fabrication and control of soft robots*. „Nature", Vol. 521, May 27 2015, 467–475.
66. Salisbury J., Roth B., *Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands*. „Journal of Mechanisms, Transmissiona and Automation in Design", Vol. 105, No. 1, 1983, 35–41, DOI: 10.1115/1.3267342.
67. Shintake J., Cacucciolo V., Floreano D., Shea H., *Soft robotic grippers*. „Advanced Materials", Vol. 30, No. 29, 2018, DOI: 10.1002/adma.201707035.
68. Stone L., *Alphabet's X launches 'computational agriculture' business Mineral*. „AI Business", October 14 2020.
69. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Strohband S., Dupont C., Jendrossek L.-E., Koelen Ch., Markey Ch., Rummel C., van Niekerk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kaehler A., Nefian A., Mahoney P., *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. „Journal of Field Robotics", Vol. 23, No. 9, 2006, 661–692, DOI: 10.1002/rob.20147.
70. Tranzatto M., Mascarich F., Bernreiter L., Godinho C., Camurri M., Khattak S., Dang T., Reijgwart V., Loeje J., Wisth D., Zimmermann S., Nguyen H., Fehr M., Solanka L., Buchanan R., Bjelonic M., Khedekar N., Valceschini M., Jenelten F., Dharmadhikari M., Homberger T., De Petris P., Wellhausen L., Kulkarni M., Miki T., Hirsch S., Montenegro M., Papachristos C., Tresoldi F., Carius J., Valsecchi G., Lee J., Meyer K., Wu X., Nieto J., Smith A., Hutter M., Siegwart R., Mueller M., Fallon M., Alexis K., *CERBERUS: Autonomous legged and aerial robotic exploration in the tunnel and urban circuits of the DARPA Subterranean Challenge*. „Field Robotics", 2022, DOI: 10.48550/arXiv.2201.07067.
71. Urmson C., Baker Ch., Dolan J., Rybski P., Salesky B., Whittaker W., Ferguson D., Darms M., *Autonomous driving in traffic: Boss and the Urban Challenge*. „AI Magazine", Vol. 30, No. 2, Summer 2009, 17–28, DOI: 10.1609/aimag.v30i2.2238.
72. Vincent J., *Welcome to the automated warehouse of the future: How british supermarket ocado is using robots to make online grocery shopping faster*. „The Verge", May 8 2018.
73. Vukobratovic M., Borovac B., *Zero-Moment Point – thirty five years of its life*. „International Journal of Humanoid Robotics", Vol. 1, No. 1, 2004, 157–173, DOI: 10.1142/S0219843604000083.
74. Wang L., Nurzaman S., Iida F., *Soft-material robotics*. Foundations and Trends in Robotics, Vol. 5, No. 3, 2017, 191–259, DOI: 10.1561/2200000055.
75. White J., *Waymo opens driverless robo-taxi service to the public in phoenix*. „Reuters", October 8 2020.
76. Zielińska T., *Maszyny kroczące*. PWN, 2014.
77. Zielińska T., *Novel design and applications of robotics technologies*. [In:] *History of Service Robots and New Trends*, 158–187. IGI Global, 2019, DOI: 10.4018/978-1-5225-5276-5.
78. Zieliński C., Kornuta T., Stefańczyk M., Szynkiewicz W., Trojanek P., Walęcki M., *Języki programowania robotów przemysłowych*. „Pomiary Automatyka Robotyka", Vol. 16, No. 11, 2012, 10–19.

Robotics: Techniques, Functions, Social Role
Part 2. Current Capabilities of Robots

Abstract: In order to assess the impact of robots on society, it is necessary to carefully analyze the state-of-the-art, and in particular the fundamental issues that have yet to be resolved, however having significant impact on the potential societal changes resulting from the development of robotics. The aforementioned impact depends on the level of intelligence of robots, so this aspect dominates in the presented analysis. The presentation has been divided into three parts: 1) analysis of technical factors affecting the intelligence and security of robots, 2) analysis of current capabilities of robots, 3) analysis of diverse predictions of how robotics will evolve, and thus the attitudes towards the influence of the result of this development on society. This part of the paper is devoted to the second of the above mentioned three issues.

Keywords: industrial robot, service robot, field robot

prof. dr hab. inż. Cezary Zieliński
cezary.zielinski@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7604-8834



Jest profesorem na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych (WETI) Politechniki Warszawskiej (PW). W PW pracuje od 1985 r., a od 2008 r. również w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów. W PW sprawował funkcje: prodziekana ds. nauki i współpracy międzynarodowej WEITI (2002-2005), zastępcy dyrektora ds. naukowych Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS) (2005-2008), dyrektora IAIS (2008-2016, 2020–) oraz prodziekana ds. ogólnych WEiTI (2016–2020). Od 1996 r. jest kierownikiem Zespołu Robotyki w IAiIS. Od 2007 roku jest członkiem Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Pracował również w Loughborough University of Technology (1992) oraz Nanyang Technological University (1999–2001). Jego zainteresowania badawcze koncentrują się na zagadnieniach związanych z metodami programowania i sterowania robotów. Jest autorem i współautorem ponad 200 publikacji z tego zakresu.